

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechnicky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vliv opětovného rozběhu asynchronního motoru na jeho rozběhové charakteristiky**  
**Influence of the Restart of Asynchronous Motor on Start.up Diagrams**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Rýznar**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: **Vliv opětovného rozběhu asynchronního motoru na jeho rozběhové charakteristiky**  
**Influence of the Restart of Asynchronous Motor on Start-up Diagrams**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:


1. Úvod
2. Teoretický rozbor přechodného děje při připojení stroje na síť
3. Měření základních charakteristik asynchronního motoru a výpočet prvků náhradního schématu
4. Tvorba simulačního modelu a modelování opětovného rozběhu asynchronního motoru
5. Měření opětovného rozběhu asynchronního motoru
6. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


Petrov, G.N. - Elektrické stroje 1, Academia 1980  
Hrabovcová, V. - Meranie a modelovanie elektrických strojov, EDIS 2008  
Bašta a kol. - Měření na elektrických strojích 2, SNTL 1959

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě: 27.4.2016



podpis studenta

## **Poděkování:**

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Čechovi, Ph.D., Ing. Stanislavu Rusnokovi a Ing. Pavlu Sobotovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na měření a vliv opětovného rozběhu asynchronního motoru. Nejdříve se seznámíme s asynchronními stroji jako takovými. Jejich konstrukčním provedením, princip činnosti, náhradní schéma, momentovou charakteristiku a způsoby spouštění motorů. Následně se rozebere pro pochopení přechodný děj v jednoduchém RL obvodu. Následně je rozebrán přechodný děj v asynchronním motoru a ukáže se jedna možnost řešení těchto dějů. Následně ze změřených charakteristik naprázdno a nakrátko se odečtou hodnoty, ze kterých se vypočítá náhradní schéma. V programu ATP se provede modelace opětovného rozběhu s různým časem opětovného rozběhu. Následně se zpracuje měření opětovného rozběhu a odečtou se proudové špičky a čas, kdy došlo k rozběhu. Nakonec se provede srovnání jednotlivých typů rozběhu.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor; spouštění motoru; přechodový jev; odpojení motoru od sítě; měření naprázdno; měření nakrátko; náhradní schéma asynchronního motoru; program ATP; model;

## **Abstrakt:**

This bachelor's thesis focuses on repeated starting of induction motor. At first it describes induction motors in general. It means their construction, principles of operation, scheme, speed-torque characteristics and ways of starting motors. Then it deals with transient operation in simple RL circuit. The description of transient operation in induction motor follow and one possible solution of these operations will be presented. A scheme is then computed by subtracting the measured characteristics of open-circuit test from short-circuit test. Modelling of repeated starting with various values for time is carried out in ATP programme afterwards. Then the measurement of repeated starting is undertaken and peak currents and time taken for starting will be subtracted. At the end the comparison of individual types of starting will be presented.

## **Key words:**

Induction motor; restart of asynchronous motor; transients; open-circuit test; short-circuit test; disconnect of asynchronous motor; equivalent circuit of asynchronous motor; ATP program; model

## Obsah

Seznam ilustrací .....	8
Seznam tabulek: .....	9
Seznam použitých symbolů:.....	10
1 Úvod .....	13
2 Asynchronní stroje .....	14
2.1 Úvod .....	14
2.2 Konstrukční provedení .....	14
2.3 Princip činnosti.....	15
2.4 Náhradní schéma asynchronního motoru .....	16
2.5 Moment a momentová charakteristika .....	17
2.6 Spouštění asynchronních motorů .....	18
2.6.1 Spouštění pomocí změnou odporu rotoru .....	18
2.6.2 Spouštění přímým připojením na síť .....	19
2.6.3 Spouštění se sníženým napětím.....	19
2.6.4 Spouštění pomocí přepínače hvězda trojúhelník.....	19
2.6.5 Spouštění pomocí frekvenčního měniče.....	20
3 Přechodový děj.....	20
3.1 Přechodový děj RL obvodu.....	21
3.2 Přechodový jev asynchronního stroje.....	22
3.2.1 Rozbor obecného přechodového děje.....	22
3.2.2 Odpojení motoru od sítě.....	25
3.2.3 Nejzávažnější přechodové děje .....	26
4 Měření naprázdno, nakrátko a výpočet náhradního schématu: .....	28
4.1 Měření naprázdno:.....	28
4.2 Měření nakrátko: .....	29
4.3 Výpočet prvků náhradního schématu asynchronního motoru .....	31
5 Simulace v programu ETMP-ATP .....	32
5.1 Parametry použitého motoru .....	33
5.2 Simulace opětovného rozběhu pro stav bez zatížení.....	35
5.2.1 Opětovný rozběh .....	35
5.2.2 Opětovný rozběh pomocí reverzace .....	36

5.2.3	Simulovaný záběrný proud.....	37
6	Měření opětovného rozběhu.....	38
6.1	Opětovný rozběh přímým připojením na síť .....	38
6.2	Opětovný rozběh při reverzaci .....	38
6.3	Opětovný rozběh při napájení přes transformátor (sníženým napětím) .....	39
7	Vyhodnocení .....	40
8	Závěr .....	40
9	Literatura .....	42
10	Seznam příloh.....	43
11	Přílohy .....	43
12	Seznam příloženého CD.....	44

### Seznam ilustrací

Obr. 1	Rez trojfázovým asynchronním motorem[2] .....	14
Obr. 2	Statorový svazek[2].....	14
Obr. 3	Rotor [9][8] .....	15
Obr. 4	Náhradní schéma a fázorový diagram asynchronního motoru[1] .....	16
Obr. 5	Momentová charakteristika asynchronního stroje pro 3 režimy[1] .....	17
Obr. 6	Momentová charakteristika motoru[1].....	17
Obr. 7	Průběh momentu a proudu při spouštění změnou odporu[2] .....	18
Obr. 8	Průběh momentu a proudu asynchronního motoru při přímém rozběhu[2] .....	19
Obr. 9	Průběh momentu a proudu při přepnutí z hvězdy do trojúhelníka[2] .....	20
Obr. 10	Momentové charakteristiky při rozběhu pomocí měniče frekvence[2].....	20
Obr. 11	Jednoduchý RL obvod pro řešení přechodového jevu .....	21
Obr. 12	Časový průběh přechodového proudu [2] .....	22
Obr. 13	Uspořádání pro nejzávažnější přechodové jevy[6] .....	27
Obr. 14	Průběh proudu motoru napájeného transformátorem[6] .....	27
Obr. 15	Schéma zapojení pro měření naprázdno .....	28
Obr. 16	Schéma zapojení pro měření nakrátko .....	30
Obr. 17	Náhradní schéma asynchronního motoru [7] .....	31
Obr. 18	Model asynchronního motoru .....	33
Obr. 19	Hlavní dialogové okno modelu UM3.....	33
Obr. 20	Jednotlivé záložky asynchronního modelu motoru.....	34
Obr. 21	Kompletní model asynchronního motoru.....	34
Obr. 22	Průběh proudů pro čas 10 ms .....	35
Obr. 23	Průběh proudů pro čas 100 ms .....	35
Obr. 24	Průběh proudů pro čas 500 ms .....	36
Obr. 25	Kompletní model asynchronního stroje s reverzací .....	36
Obr. 26	Průběh proudů pro čas 10 ms .....	36
Obr. 27	Průběh proudů pro čas 100 ms .....	37



Obr. 28 Průběh proudů pro čas 500 ms .....	37
Obr. 29 Průběh opětovného rozběhu přímým připojením na síť .....	38
Obr. 30 Průběh opětovného rozběhu při reverzaci .....	38
Obr. 31 Průběh opětovného rozběhu při napájení přes transformátor (sníženým napětím) .....	39
Graf. 1 Charakteristiky měření naprázdno .....	29
Graf. 2 Charakteristika měření nakrátko .....	31

### **Seznam tabulek:**

Tab. 1 Jmenovité hodnoty asynchronního motoru .....	28
Tab. 2 Měření asynchronního motoru naprázdno .....	28
Tab. 3 Měření asynchronního motoru nakrátko .....	30
Tab. 4 Odečtené hodnoty naprázdno a nakrátko .....	31
Tab. 5 Parametry motoru .....	33
Tab. 6 Odečtené záběrné proudy pro průběhy .....	37
Tab. 7 Nárazové proudy při jednotlivých rozbězích .....	38
Tab. 8 Nárazové proudy při jednotlivých rozbězích .....	39
Tab. 9 Nárazové proudy při jednotlivých rozbězích .....	39

## Seznam použitých symbolů:

Symbol	Název	Jednotka
$\cos \varphi_k$	Účinník nakrátko	[-]
$\cos \varphi_{kN}$	Jmenovitý účinník nakrátko	[-]
$\cos \varphi_0$	Účinník naprázdno	[-]
$\cos \varphi_{0N}$	Jmenovitý účinník naprázdno	[-]
$E_1$	Elektromagnetická síla	[V]
$E_1'$	Elektromagnetická síla přepočítaná na stator	[V]
$f$	Frekvence	[Hz]
$f_1$	Frekvence statoru	[Hz]
$f_2$	Frekvence rotoru	[Hz]
$I$	Proud	[A]
$I'$	Snížený proud	[A]
$I_0$	Proud naprázdno	[A]
$I_{0N}$	Jmenovitý proud naprázdno	[A]
$I_1$	Proud v statoru	[A]
$I_2$	Proud v rotoru přepočítaný na stator	[A]
$I_N$	Jmenovitý proud	[A]
$I_{Fe}$	Proud v železe	[A]
$I_f$	Fázový proud	[A]
$I_k$	Proud nakrátko	[A]
$I_{kN}$	Jmenovitý zkratový proud	[A]
$I_{MAX}$	maximální proud	[A]
$I_s$	Sdružený proud	[A]
$I_Z$	Záběrný proud	[A]
$I_\mu$	Proud magnetizační reaktance	[A]
$i$	okamžitá hodnota proudu	[A]
$i'$	ustálená složka proudu	[A]
$i''$	přechodná složka proudu	[A]
$i_{1U}$	okamžitá hodnota proudu fáze $U$ statoru	[A]
$i_{1V}$	okamžitá hodnota proudu fáze $V$ statoru	[A]
$i_{1W}$	okamžitá hodnota proudu fáze $W$ statoru	[A]
$i_{1\alpha}$	Okamžitá hodnota proudu dvoufázového vinutí statoru	[A]
$i_{1\beta}$	Okamžitá hodnota proudu dvoufázového vinutí statoru	[A]
$i_{10}$	Nulová složka proudu statoru	[A]
$i_{2u}$	okamžitá hodnota proudu fáze $u$ rotoru	[A]
$i_{2v}$	okamžitá hodnota proudu fáze $v$ rotoru	[A]
$i_{2w}$	okamžitá hodnota proudu fáze $w$ rotoru	[A]
$i_{2\alpha}'$	Okamžitá hodnota proudu dvoufázového vinutí točícího se rotoru	[A]
$i_{2\beta}'$	Okamžitá hodnota proudu dvoufázového vinutí točícího se rotoru	[A]
$i_{20}$	Nulová složka proudu rotoru	[A]
$J$	Moment setrvačnosti	[kg·m <sup>2</sup> ]
$L$	Indukčnost	[H]

$L$	Vlastní indukčnost	[H]
$L_{10}$	Indukčnost nulové složky fáze statoru	[H]
$L_{20}$	Indukčnost nulové složky fáze rotoru	[H]
$L_{22}$	Vlastní indukčnost rotorového vinutí	[H]
$L_{\sigma\sigma}$	Rozptylová indukčnost statoru	[H]
$L_{\tau\sigma}'$	Rozptylová indukčnost rotoru	[H]
$L_{\sigma}$	Celková rozptylová indukčnost	[H]
$M$	Vzájemná indukčnost	[H]
$M_i$	Vnitřní [elektromagnetický] moment	[N·m]
$M_m$	Moment motoru	[N·m]
$M_N$	Jmenovitý moment	[N·m]
$M_o$	Mechanický moment	[N·m]
$M_p$	Zátěžný moment	[N·m]
$M_{ZAB}$	Záběrný moment	[N·m]
$M'_{ZAB}$	Snížený záběrný moment	[N·m]
$N_1$	Počet závitů statoru	[-]
$n$	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$n_s$	Synchronní otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$P$	Výkon	[W]
$P_0$	Výkon naprázdno	[W]
$\Delta P_{Fe}$	Ztráty v železe	[W]
$\Delta P_{j0}$	Joulovy ztráty při chodu naprázdno	[W]
$\Delta P_m$	Mechanické ztráty	[W]
$p$	počet pólů	[-]
$R$	Odpor	[Ω]
$R_1$	Odpor statorového vinutí	[Ω]
$R_2$	Odpor rotorového vinutí	[Ω]
$R_2'$	Odpor rotoru přepočítaný na stator	[Ω]
$R_{Fe}$	Odpor v železe	[Ω]
$R_i$	Vnitřní odpor cívky	[Ω]
$s$	Skluz	[-]
$U$	Napětí	[V]
$U'$	Snížené napětí	[V]
$U_0$	Napětí naprázdno	[V]
$U_1$	Napětí	[V]
$U_f$	Fázové napětí	[V]
$U_s$	Sdružené napětí	[V]
$U_{fN}$	Jmenovité fázové napětí	[V]
$U_k$	Napětí nakrátko	[V]
$U_{MAX}$	Maximální napětí	[V]
$u_{1U}$	okamžitá hodnota napětí fáze $U$ statoru	[V]
$u_{1V}$	okamžitá hodnota napětí fáze $V$ statoru	[V]
$u_{1W}$	okamžitá hodnota napětí fáze $W$ statoru	[V]

$u_{2u}$	okamžitá hodnota napětí fáze $u$ rotoru	[V]
$u_{2v}$	okamžitá hodnota napětí fáze $v$ rotoru	[V]
$u_{2w}$	okamžitá hodnota napětí fáze $w$ rotoru	[V]
$X_{s\sigma}$	Rozptylová reaktance statoru	[ $\Omega$ ]
$X_{r\sigma}'$	Rozptylová reaktance rotoru	[ $\Omega$ ]
$X_{\mu}$	Magnetická reaktance	[ $\Omega$ ]
$X_{\sigma}$	Celková rozptylová reaktance	[ $\Omega$ ]
$X'_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator	[ $\Omega$ ]
$Z$	Impedance	[ $\Omega$ ]
$Z_K$	Impedance motoru	[ $\Omega$ ]
$Z_N$	Jmenovitá impedance	[ $\Omega$ ]
$Z_0$	Impedance příčné větve náhradního schématu	[ $\Omega$ ]
$Z_1$	Impedance statoru	[ $\Omega$ ]
$Z'_2$	Impedance rotoru přepočítaná na stator	[ $\Omega$ ]
$\alpha$	Fázový úhel v okmažiku zapnutí	[rad]
$\tau$	Časová konstanta	[s]
$\varphi$	fázový posun	[°]
$\phi_{vz}$	Magnetický tok ve vzduchové mezeře	[Wb]
$\phi$	Magnetický tok	[Wb]
$\Psi$	Spražený magnetický tok	[Wb]
$\omega$	Úhlový kmitočet	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$\omega_1$	Úhlová rychlost statoru	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$\omega_2$	Úhlová rychlost rotoru	[rad·s <sup>-1</sup> ]

# 1 Úvod

V této bakalářské práci se budu zabývat problematikou nárazové proudové špičky při opětovném rozběhu motoru, který následuje bezprostředně po předchozím rozběhu a odpojení od sítě. V praxi se s touto problematikou můžeme setkat např. u jeřábových asynchronních motorů, kde může počet sepnutí dosahovat 600 až 900 za hodinu.[1]

Práce bude rozdělena do 6 částí. V první části se seznámíme s asynchronními motory jako takovými. Tedy s konstrukčním provedením, na jakém principu pracují, náhradní schéma stroje, s momentovou charakteristikou a se způsoby rozběhu stroje.

Následující část se bude zabývat přechodnými ději ve stroji. Kde si rozebereme jednoduchý RL obvod, abychom pochopili základní rovnice tohoto děje. Následně popíšeme a nabídneme řešení přechodného děje v asynchronním stroji a řekneme si něco o nezávažnějších přechodných dějech.

V další části bude zpracované měření naprázdno a nakrátko a z jejich charakteristik si odečteme hodnoty pro výpočet náhradního schématu stroje, který následně použijeme pro simulaci v programu EMTP-ATP.

Jak už bylo zmíněno následující část bude zaměřena na simulaci opětovného rozběhu našeho měřeného motoru. Je zde probráno základní nastavení modelu asynchronní motoru a nasimulují se tři průběhy s jiným časem znovu připojení stroje k síti pro normální zapojení a reverzace.

Následně se rozebere měření opětovného rozběhu, který bylo změřeno pro tři typy zapojení. Z toho měření se odečtou hodnoty nárazových špiček a čas, při kterém nastal opětovný rozběh.

V předposlední a poslední část bude věnovaná vyhodnocení měření a simulovaných hodnot v programu ATP. Bude zmínka o rizících, jaké přináší opětovný rozběh.

## 2 Asynchronní stroje

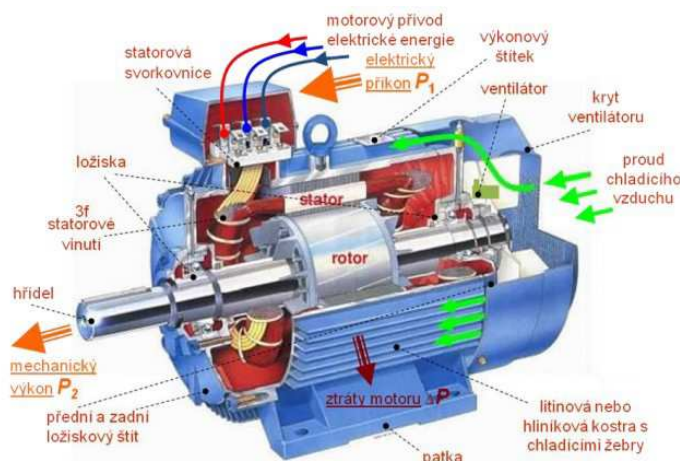
### 2.1 Úvod

Asynchronní motor je nejrozšířenější elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou nebo naopak, avšak jako alternátor se používá pouze výjimečně. V průmyslu se používá už více jak 100 let. Jeho nízká pořizovací cena, nenáročnost na údržbu, jednoduchost konstrukce, dobrá provozní schopnost a rozsah vyráběných výkonů, které se pohybují od několika wattů po desítky MW, je důvodem této rozšířenosti. S příchodem měniče kmitočtu mohou asynchronní motory dosahovat několik set tisíc otáček a můžeme je využívat jako ventilátory, pračky, kompresory, čerpadla, pohony dopravníků, výtahy, jeřáby apod.[1]

K jeho nevýhodám patří potřeba jalové energie bez které nemohou splňovat svoji činnost. Další je obtížná regulace otáček a proudové rázy vznikající při rozběhu, ale v dnešní době je toto řešeno např. pomocí měničů kmitočtu.[1]

### 2.2 Konstrukční provedení

Asynchronní motory můžeme dělit podle statorového vinutí, a to na trojfázové a jednofázové, a rotorového vinutí, a to klecový nebo kroužkový. Mají několik podstatných částí (obr.1), přičemž nejdůležitější je stator a rotor.[3]



Obr. 1 Rez trojfázovým asynchronním motorem[2]

Stator stroje je složen z dynamoplechů a nazývá se statorový svazek (obr.2), který má na vnitřní straně drážky, ve kterých je uloženo statorové vinutí. Do litinové kostry je tento svazek nalisován, který umožňuje připevnění k základu. Začátky a konce statorového vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici a vinutí můžeme zapojit do hvězdy nebo trojúhelníka.[3]



Obr. 2 Statorový svazek[2]

Rotor stroje je stejně jako stator složen z dynamoplechů. U menších motorů je rotor nalisován na hřídel a u větších strojů je připevněn na rotorové nosné hvězdě. Pokud se jedná o klecový rotor (obr.1b) má na svých koncích vodivé kruhy, které jsou spojeny vodivými tyčemi. Kruhy a tyče jsou z hliníku, který je nastříkán do drážek a zvláštních přiložených forem, ve kterých vzniknout kruhy.[3]

Za to kroužkové motory(obr.3b a na obr3c je sběrací ústrojí) mají rotorového vinutí spojeno do uzlu, které je zapojeno nejčastěji do hvězdy, a začátky jsou vyvedeny na kroužky umístěné na hřídeli. Na kroužky dosedají kartáče. Za tyto kroužky můžeme zapojit do rotorového obvodu odporníky pro řízení otáček nebo snížení záběrného proudu.[3]



Obr. 3 Rotor [9][8]

### 2.3 Princip činnosti

Základní princip činnosti asynchronního motoru je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru, který indukuje napětí v rotorovém vinutí. Pro dosažení točivého magnetického pole použijeme trojfázové vinutí, kde jsou jednotlivá vinutí posunuta o 120°. [1] [2]

Po připojení trojfázového motoru ke zdroji elektrické energie vznikne ve statorovém vinutí točivé magnetické pole. Jeho siločáry protínají rotorové vinutí a začne se indukovat napětí ve vinutí. To vede ke vzniku proudu a následně dojde k vzájemným silovým působením mezi vinutími a rotor se roztočí. Otáčky rotoru se ustálí na hranici blízké synchronní, aby byla zachována indukovaná elektromotorická síla, musí se rotor otáčet menšími otáčky než pole statoru. Tudíž v motoru se nachází dvě úhlové rychlosti jedna statoru  $\omega_1$  a rotoru  $\omega_2$ , přičemž každá z nich má jinou frekvenci. [1]

Otáčky točivého magnetického pole statoru se vypočítají

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

V okamžiku kdy motor začneme zatěžovat vzroste proud, indukované napětí a začnou klesat jeho otáčky. Pokles otáček se udává jako skluz  $s$ , který je dán vztahem [1]

$$n_s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

Rychlost otáčení rotoru je pak dána

$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad (2.3)$$

a frekvence indukovaného napětí je

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (2.4)$$

## 2.4 Náhradní schéma asynchronního motoru

Náhradní schéma má velký význam pro rozbor práce asynchronního stroje: Charakterizují jednotlivé stavy stroje a umožňují stanovit závislost mezi veličinami. U proudového diagramu a kruhového diagramu usnadňuje studium těchto diagramů.[1]

Náhradní schéma je pospojované z odporů a reaktancí volených tak, aby odpovídalo určitým vlastnostem, které by měli být jednotné se skutečným motorem.[1]

Rovnice pro náhradní schéma mají tento tvar

$$U_1 = Z_1 \cdot I_1 + Z_0 \cdot I_0 \quad (2.5)$$

$$0 = Z_2' \cdot I_2' + Z_0 \cdot I_0 \quad (2.6)$$

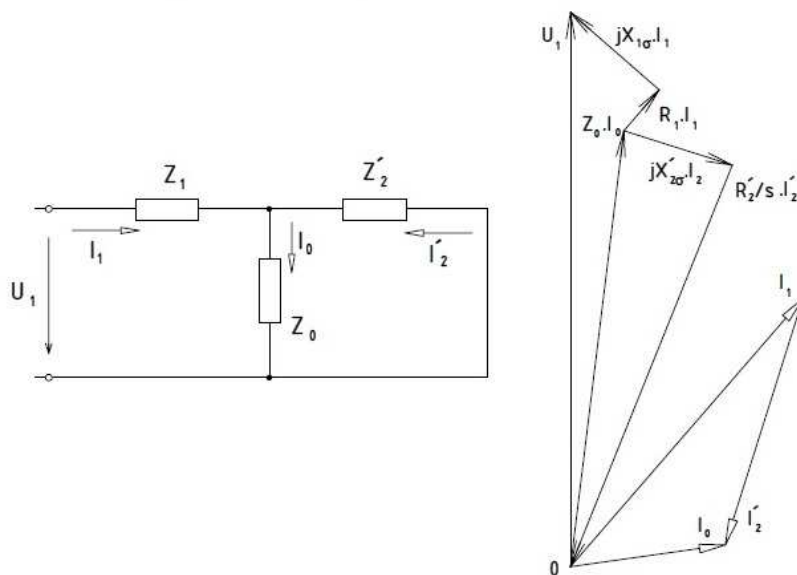
$$I_1 + I_2' = I_0 \quad (2.7)$$

Kde impedance motoru  $Z_1$  a impedance ekvivalentního stojícího rotoru přepočítaná na stator  $Z_2'$  je

$$Z_1 = R_1 + jX_{1\sigma} \quad (2.8)$$

$$Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}' \quad (2.9)$$

Náhradní schéma a příslušný fázorový jsou uvedeny níže.



Obr. 4 Náhradní schéma a fázorový diagram asynchronního motoru[1]

Jak plyne z rovnic 1.8 a 1.8, velikost impedancí je závislá na odporech  $R_1$  a  $R_2'$ , které se s měnící teplotou, za to reaktance  $X_{1\sigma}$  a  $X_{2\sigma}'$  jsou závislé na proudech, které procházejí státorem a rotorem. Pokud vzroste syčení cest díky proudu, který vzroste, dojde ke snížení reaktancí. Další vliv na velikost reaktancí má skluz, jelikož se s ním mění i frekvence rotoru. Se skluzem se ještě mění i nasycení magnetického stroje. Pokud se skluz mění ve větších mezích, mění se i impedance  $Z_1$ ,  $Z_2'$  a  $Z_0$ . Pokud musíme řešit tento případ, tak musíme vypočítat impedance pro různé skluzy.[4]



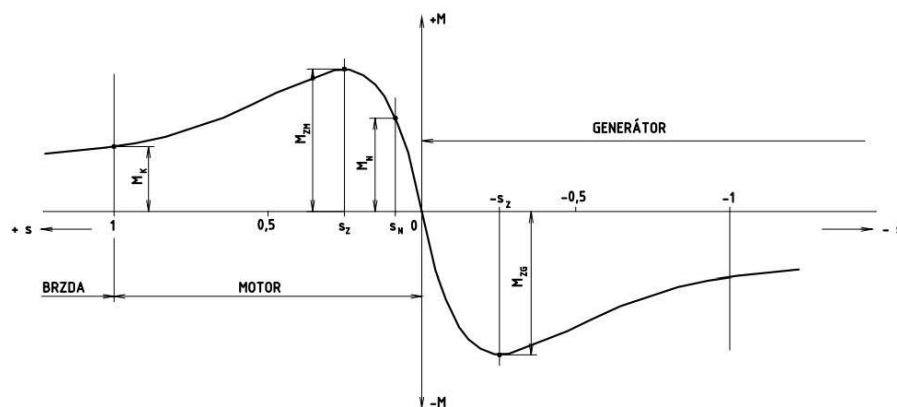
## 2.5 Moment a momentová charakteristika

Mechanický výkon odpovídá točivému momentu motoru, který se vypočítá

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = 9,55 \frac{P}{n} \quad (2.10)$$

Ze rovnice 1.5 je vidět, že velikost momentu je úměrná výkonu stroje a nepřímo úměrná otáčkám.

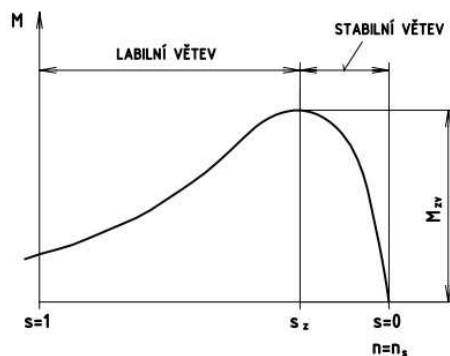
Momentová charakteristika je znázorněním vlastností daného stroje. Je to průběh momentu na skluzu, popřípadě otáčkách. Na následujícím obrázku je momentová charakteristika pro 3 režimy (brzda, motor a generátor).[2]



Obr. 5 Momentová charakteristika asynchronního stroje pro 3 režimy[1]

V režimu brzda je skluz motoru větší než 1. Motorický režim nastává pokud se skluz stroje pohybuje mezi 1 a 0. V tomto případě stroj odebírá ze sítě elektrickou energii a přeměňuje ji na mechanickou. Generátorický režim stroje nastává při nižším skluzu než 0. Z toho vyplývá, že otáčky stroje jsou větší než synchronní, tak motor odebírá mechanickou energii a přeměňuje ji na elektrickou, kterou dodává do sítě a odebírá jalovou energii. [1]

Momentová charakteristika motoru je zobrazena na obr.5, která je rozdělena na labilní a stabilní část. Tyto dvě části rozděluje moment zvratu  $M_{zv}$ , který má svůj skluz zvratu. Pokud budou otáčky pořád stoupat, po překročení momentu zvratu, dostane se motor do labilní části a moment motoru klesá a nemůže zde motor pracovat stabilně.[1]



Obr. 6 Momentová charakteristika motoru[1]

Momentová charakteristika je znázornění vlastností daného stroje. Je to průběh momentu na skluzu, popřípadě otáčkách. Na následujícím obrázku je momentová charakteristika pro 3 režimy (brzda, motor a generátor).[2]

## 2.6 Spouštění asynchronních motorů

Při spouštění asynchronního motoru vzniknou velké proudové rázy, které jsou způsobeny zmenšením impedance motoru, protože při rozběhu rotor stojí a má skluz rovný jedné. Při opětovném rozběhu může mít tyto rázy značný vliv na vlastnosti.[4]

K posouzení rozběhových vlastností používáme tyto ukazatele.

Poměr záběrného proudu ku jmenovitému, který by neměl přesáhnout 7,5 násobek jmenovitého proudu.[1]

$$k_i = \frac{I_z}{I_N} \quad (2.11)$$

a záběrný proud je dán vztahem

$$I_z = \frac{U_l}{Z_K} \quad (2.12)$$

Z rovnice 1.12 můžeme vidět, že záběrný proud při spouštění se dá omezit napájecím napětím nebo impedencí, které jde použít pouze u kroužkových motorů.[1]

Další údaj je plynulost časové změny rozběhového proudu.

Poměr záběrného momentu ku jmenovitému je také důležitý údaj, přičemž záběrný moment můžeme snížit napětím nebo připojením odporu do rotoru motoru.[1]

$$k_M = \frac{M_{ZAB}}{M_N} \quad (2.13)$$

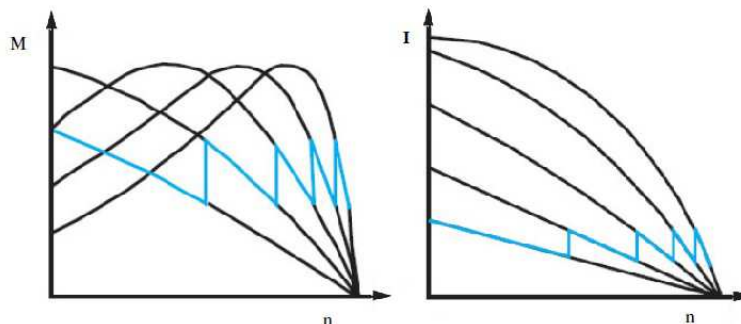
Doba rozběhu  $t_a$  závisí na momentu setrvačnosti, který je složen vlastního momentu motoru a přídatného momentu, a rozdíl mezi momentem motoru a momentem zátěží.[1]

$$t_a = \frac{J \cdot (n - n_0)}{9,55 \cdot (M_m - M_z)} \quad (2.14)$$

### 2.6.1 Spouštění pomocí změnou odporu rotoru

Tento typ spouštění jde použít pouze u kroužkových asynchronních motorů, při spouštění rezistorem plynule nebo stupňovitě vyřazujeme, až se vinutí rotoru spojí dokrátka.[2]

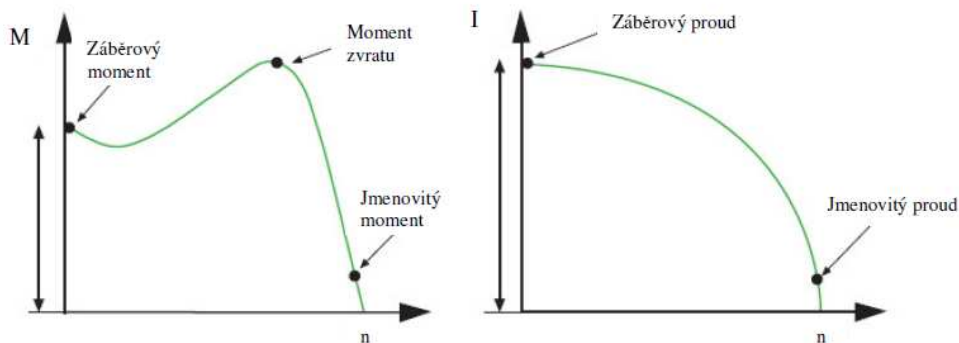
Při zařazování odporu do rotoru motoru se mění jeho momentová charakteristika. Z obr.7 můžeme vidět, že můžeme zvětšovat nebo snižovat záběrný moment, přičemž se nám mění i záběrný proud.[1]



Obr. 7 Průběh momentu a proudu při spouštění změnou odporu[2]

### 2.6.2 Spouštění přímým připojením na síť

Motory do 3kW lze připojit přímo na síť nízkého napětí. Avšak parametry sítě rozhodují o vhodnosti přímého připojení daného motoru daného výkonu. Motory výkonech MW můžeme přímo připojit pokud máme dostatečně tvrdou síť.[1]



Obr. 8 Průběh momentu a proudu asynchronního motoru při přímém rozběhu[2]

### 2.6.3 Spouštění se sníženým napětím

Používá se v případě, kdy nepotřebujeme při spouštění plný záběrný moment a velikost sníženého momentu můžeme určit následovně.[1]

$$M'_{ZAB} = M_{ZAB} \cdot \left( \frac{U'}{U_N} \right)^2 = M_{ZAB} \cdot \left( \frac{I'}{I_N} \right)^2 \quad (2.15)$$

Existuje několik způsobů jak docílit spouštění se sníženým napětím. Např. podřazeným rezotirem, předzařením do statorového vinutí tlumivku, spouštěcí autotransformátor, nebo přepínač hvězda trojúhelník.[1]

### 2.6.4 Spouštění pomocí přepínače hvězda trojúhelník

Při spouštění je vinutí motoru zapojeno do hvězdy, tím se sníží fázová hodnota napětí o  $\sqrt{3}$ , ale motor musí být jeho vinutí pro jmenovité provozní napětí zapojeno do trojúhelníka.[1]

Rovnice pro síťový proud pro Y (2.16) a pro D (2.17).

$$I_s = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_N} \quad (2.16)$$

$$I_f = \frac{\sqrt{3} \cdot U_s}{Z_N} \quad (2.17)$$

Poměr proudu ve hvězdě a trojúhelníku.

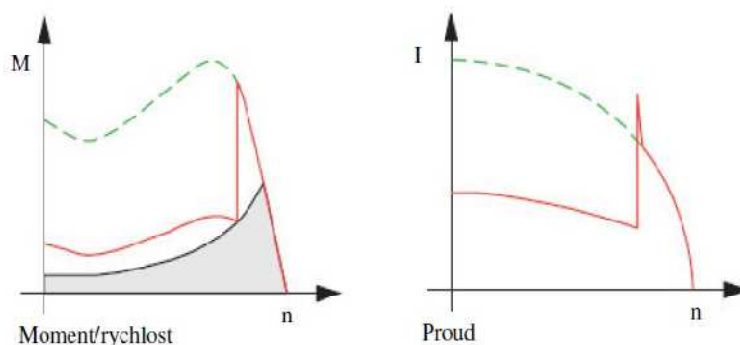
$$\frac{I_s}{I_f} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_N}}{\frac{\sqrt{3} \cdot U_s}{Z_N}} = \frac{1}{\sqrt{3}^2} = \frac{1}{3} \quad (2.18)$$

Velikost momentu při Y a následném přepnutí do trojúhelníku.

$$\frac{U_D}{U_Y} = \frac{400}{690} = \frac{1}{\sqrt{3}} \rightarrow M \propto U^2 \Rightarrow M = \left( \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (2.19)$$

Z rovnice 2.18 je jasné, že záběrný moment a proud se sníží o třetinu, avšak hodnota napětí se sníží pouze o  $\sqrt{3}$ . Z tohoto důvodu je možné použít tuto metodu jen u menších a střeňích výkonů (15 kW až 20 kW). [1]

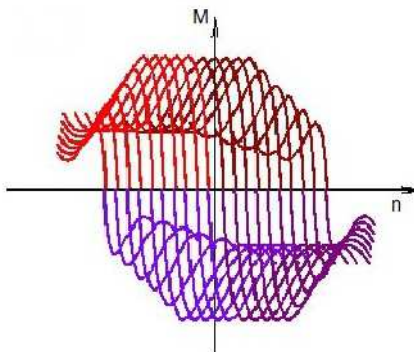
Při přepnutí může nastat proudový náraz, v nevhodném okamžiku, kdy dojde k přepnutí z hvězdy do trojúhelníka.[1]



Obr. 9 Průběh momentu a proudu při přepnutí z hvězdy do trojúhelníka[2]

### 2.6.5 Spouštění pomocí frekvenčního měniče

Při tomto typu spouštění můžeme nejen rozběhnout motor, ale můžeme řídit i jeho otáčky, přičemž toto předchozí způsoby nemohly. Pokud chceme motor spouštět s připojenou zátěží, tak to nemá žádný vliv, protože motor už vyvíjí dostatečný moment.[2]



Obr. 10 Momentové charakteristiky při rozběhu pomocí měniče frekvence[2]

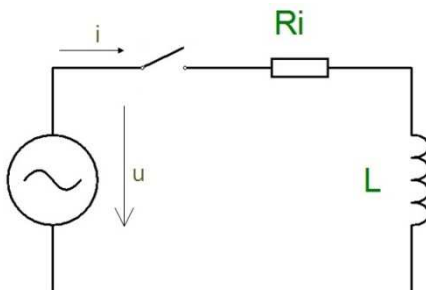
## 3 Přechodový děj

K přechodovému ději dochází při náhlých změnách poměrů v obvodu, např. zapínání nebo vypínání obvodu a trvá pouze po určitý čas. Jeho délka trvání je dána parametry obvodu, abychom jsme je mohli analyzovat musíme si skutečný obvod nahradit náhradním obvodem.

Náhradní obvod se může skládat s rezistorů, induktorů a kapacitorů, přičemž tyto prvky můžeme použít pro vyjádření skutečného obvodu, kde jsou rozloženy. Při výpočtu přechodových jevů se snažíme skutečný obvod nahradit obvodem se soustředěnými parametry, protože při uvažování obvodu s rozprostřenými parametry je výpočet složitější, ale v některých případech to není možné. Výsledky toho řešení bude přesné jenom do takové míry, jak bude náhradní prvky odpovídat skutečným. [5]

### 3.1 Přechodový děj RL obvodu

Budeme předpokládat střídavé napětí, které má sinusový průběh  $u = U_{\text{MAX}} \cdot \sin(\omega t + \alpha)$  a předbíhá proud. Při připojení obvodu na síť vznikne přechodový děj. Proud vzrůstá z nulové hodnoty a po určitém čase se ustálí na hodnotu proudu, který prochází obvodem při ustáleném stavu. [5]



Obr. 11 Jednoduchý RL obvod pro řešení přechodového jevu

Proud při zapnutí obvodu bude mít 2 složky:

$$i = i' + i'' \quad (3.1)$$

První složka proudu  $i'$  je ustálená a vypočítá se:

$$i' = \frac{U_{\text{MAX}}}{Z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (3.2)$$

kde úhel fázového posunu  $\varphi$  je dán prvky obvodu:

$$\varphi = \arctan \frac{\omega \cdot L}{R_i} \quad (3.3)$$

Druhá složka proudu  $i''$  bude mít exponenciální charakter, která zaniká s časem a čas zániku závisí na hodnotě časové konstanty:

$$i'' = \frac{U_{\text{MAX}}}{Z} \cdot \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.4)$$

kde časová konstanta je:

$$\tau = \frac{L}{R_i} \quad (3.5)$$

a impedance se vypočítá:

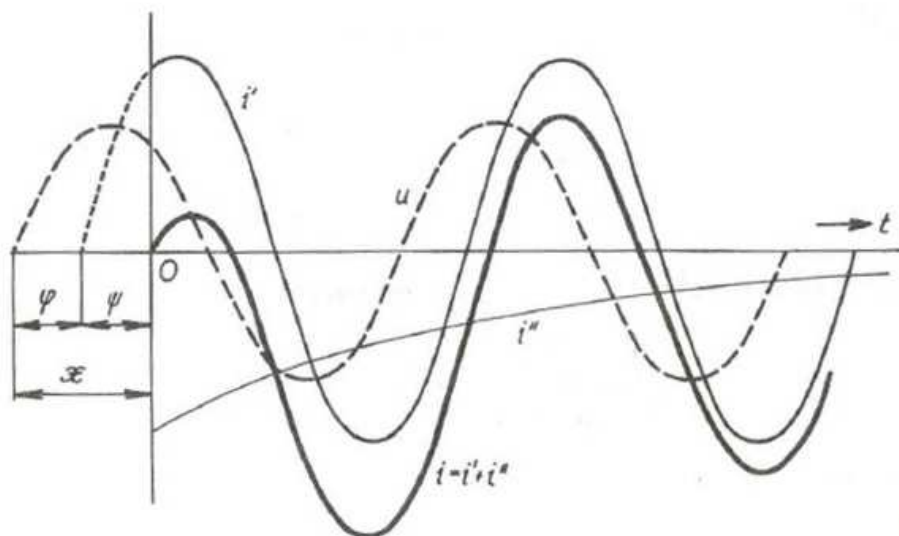
$$Z = \sqrt{R_i^2 + \omega^2 \cdot L^2} \quad (3.6)$$

a maximální proud:

$$I_{\text{MAX}} = \frac{U_{\text{MAX}}}{R_i} \quad (3.7)$$

Dosazením rovnic 2.12 a 2.14 do rovnice 2.11 a následnou úpravou můžeme napsat vztah pro celkový proud při zapnutí obvodu:

$$i = I_{\text{MAX}} \cdot \left[ \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (3.8)$$



Obr. 12 Časový průběh přechodového proudu [2]

Při zapnutí obvodu může dojít ke dvěma mezním stavům. První stav nastává, když proud při zapnutí má svojí maximální hodnotu a druhý pokud proud prochází nulou. První stav bude mít ustálenou a přechodovou složku a nastává když součet fázový posunů obvodu a napětí je maximální. [5]

Druhý stav, který je mnohem příznivější, bude mít také 2 složky, ale jeho přechodová složka můžeme být zanedbána, protože její velikost je nulová  $i'' = 0$  A a v tom případě je součet fázových posunů obvodu a napětí roven nule. Tedy při zapnutí bude proud nabývat hodnot jako ustálená složka proud  $i = i'$ . [5]

### 3.2 Přechodový jev asynchronního stroje

Přechodné děje vznikají při připojení a odpojení a při rychlé změně zatížení v asynchronních strojích.[4]

Řešení těchto dějů je velmi obtížné, protože existují magnetické vazby mezi vinutími a obě vinutí motoru mění periodicky svoji polohu, při měnícím se skluzu, a vzájemná indukčnost  $M_{12}$  mezi vinutím statoru a rotoru se také mění periodicky. Diferenciální rovnice mají některé proměnné, které jsou periodicky závislé na čase, a tedy řešení rovnic je ztíženo.[4]

#### 3.2.1 Rozbor obecného přechodového děje

Elektromagnetické přechodné děje vznikají ve statorovém a rotorovém vinutí. Napišme si základní napěťové rovnice pro všechny fáze statoru a rotoru.[4]

Napěťové rovnice pro stator:

$$u_{1U} = R_1 \cdot i_{1U} + \frac{d\psi_{1U}}{dt} \quad (3.9)$$

$$u_{1V} = R_1 \cdot i_{1V} + \frac{d\psi_{1V}}{dt} \quad (3.10)$$

$$u_{1W} = R_1 \cdot i_{1W} + \frac{d\psi_{1W}}{dt} \quad (3.11)$$

Napěťové rovnice pro rotor:

$$u_{2u} = -R_2 \cdot i_{2v} - \frac{d\psi_{2u}}{dt} \quad (3.12)$$

$$u_{2v} = -R_2 \cdot i_{2v} - \frac{d\psi_{2v}}{dt} \quad (3.13)$$

$$u_{2w} = -R_2 \cdot i_{2w} - \frac{d\psi_{2w}}{dt} \quad (3.14)$$

Sprážené magnetické toky jednotlivých vinutí statoru:

$$\psi_{1U} = L_U i_{1U} + M_{UV} i_{1V} + M_{UW} i_{1W} + M_{Uu} i_{2u} + M_{Uv} i_{2v} + M_{Uw} i_{2w} \quad (3.15)$$

$$\psi_{1V} = L_V i_{1V} + M_{VU} i_{1U} + M_{VW} i_{1W} + M_{Vu} i_{2u} + M_{Vv} i_{2v} + M_{Vw} i_{2w} \quad (3.16)$$

$$\psi_{1W} = L_W i_{1W} + M_{WU} i_{1U} + M_{WV} i_{1V} + M_{Wu} i_{2u} + M_{Wv} i_{2v} + M_{Ww} i_{2w} \quad (3.17)$$

Struktura pro výpočet rovnic rotoru je stejná jako pro stator, z toho plyne, že tři rovnice můžeme vynechat.

Vnitřní elektromagnetický moment motoru určíme jako derivaci magnetické energie vinutí podle natočení  $d\vartheta$ , pokud je větší počet pólů, tak mechanický úhel rotoru je  $p$  krát menší než elektrický. Tento moment při předpokladu, že otáčení rotoru je  $d\vartheta$  budou proudy v obouh vinutí nezměněné.[4]

$$M_i = i_{1U} i_{2u} \frac{dM_{Uu}}{d\vartheta} + i_{1U} i_{2v} \frac{dM_{Uv}}{d\vartheta} + i_{1U} i_{2w} \frac{dM_{Uw}}{d\vartheta} + i_{1V} i_{2u} \frac{dM_{Vu}}{d\vartheta} + i_{1V} i_{2v} \frac{dM_{Vv}}{d\vartheta} + \\ + i_{1V} i_{2w} \frac{dM_{Vw}}{d\vartheta} + i_{1W} i_{2u} \frac{dM_{Wu}}{d\vartheta} + i_{1W} i_{2v} \frac{dM_{Wv}}{d\vartheta} + i_{1W} i_{2w} \frac{dM_{Ww}}{d\vartheta} \quad (3.18)$$

Pokud se motor otáčí proměnlivou rychlostí musí být předchozí rovnice doplněny o pohybovou rovnici.[4]

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + M_p + M_0 + M_i = 0 \quad (3.19)$$

Řešení je velice obtížné, protože závisí na úhlu natočení a vzájemné indukčnosti mezi statorem a rotorem.[4]

$$M_{Uu} = M_{Uu\max} \cos \vartheta \quad (3.20)$$

$$M_{Uv} = M_{Uv\max} \cos \left( \vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \quad (3.21)$$

$$M_{Uw} = M_{Uw\max} \cos \left( \vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (3.22)$$

Pro ostatní vzájemné indukčnosti  $M_{Vu}$ ,  $M_{Vv}$ ,  $M_{Vw}$ ,  $M_{Wu}$ ,  $M_{Wv}$  a  $M_{Ww}$  platí stejné rovnice.[4]

Pro řešení těchto rovnic použijeme transformaci  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $0$ . Princip spočívá, že trojfázová vinutí v motoru nahradíme dvoufázovým vinutím a rotor se nebude otáčet. Tímto se nám zjednoduší rovnice, ze kterých jsme vycházeli.[4]

Rozeberme si tedy trojfázový a ekvivalentní dvoufázový motor. Vztahy pro proudy v jednotlivých fázích dvoufázového motoru jsou dány rovnicemi 2.23 až 2.25, které za podmínky, že magnetomotorické síly, které působí v všech fázích trojfázového motoru, se nesmí změnit a počet závitů jednotlivých fází bude stejný.[4]

$$i_{1U} = i_{1\alpha} + i_{10} \quad (3.23)$$

$$i_{1V} = -\frac{1}{2}i_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1\beta} + i_{10} \quad (3.24)$$

$$i_{1W} = -\frac{1}{2}i_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1\beta} + i_{10} \quad (3.25)$$

Pokud nahradíme znak proudu  $i$  napětím  $u$ , z výše uvedených rovnic, můžeme sestavit napěťové rovnice pro stator.[4]

Z rovnic 2.23 až 2.25 můžeme vyjádřit jednotlivé proudy  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  a  $i_{10}$ .

$$i_{1\alpha} = \frac{2}{3}[i_{1U} - 0,5 \cdot (i_{1V} + i_{1W})] \quad (3.26)$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1V} - i_{1W}) \quad (3.27)$$

$$i_{10} = \frac{1}{3}(i_{1U} + i_{1V} + i_{1W}) \quad (3.28)$$

Jako v předchozím případě můžeme provést náhradu proudu za napětí a získáme příslušné hodnoty pro napětí  $u_{1\alpha}$ ,  $u_{1\beta}$  a  $u_{10}$ . [4]

$$i'_{2\alpha} = \frac{2}{3}[i_{2u} - 0,5 \cdot (i_{2v} + i_{2w})] \quad (3.29)$$

$$i'_{2\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{2v} - i_{2w}) \quad (3.30)$$

$$i_{20} = \frac{1}{3}(i_{2u} + i_{2v} + i_{2w}) \quad (3.31)$$

Další krokem nahradíme točící se trojfázové vinutí rotoru dvoufázovým vinutím  $\alpha$ ,  $\beta$ . [4]

$$i_{2\alpha} = i'_{2\alpha} \cos \varphi - i'_{2\beta} \sin \varphi = \frac{2}{3}[i_{2u} - 0,5(i_{2v} + i_{2w})] \cos \varphi - \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{2v} - i_{2w}) \sin \varphi \quad (3.32)$$

$$i_{2\beta} = i'_{2\alpha} \sin \varphi - i'_{2\beta} \cos \varphi = \frac{2}{3}[i_{2u} - 0,5(i_{2v} + i_{2w})] \sin \varphi - \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{2v} - i_{2w}) \cos \varphi \quad (3.33)$$

$$i_{20} = \frac{1}{3}(i_{2u} + i_{2v} + i_{2w}) \quad (3.34)$$

V následujícím kroku nahradíme točící se dvoufázové rotorové vinutí stojícím, které má stejné osy s dvoufázovým statorovým vinutím. Za podmínky, že magnetomotorické síly v osách  $\alpha$ ,  $\beta$  statoru rovnají rotoru. [4]

$$i_{2u} = i_{2\alpha} \cdot \cos \varphi + i_{2\beta} \cdot \sin \varphi + i_{20} \quad (3.35)$$

$$i_{2v} = -i_{2\alpha} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \sin \varphi + \cos \varphi}{2} + i_{2\beta} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi - \sin \varphi}{2} + i_{20} \quad (3.36)$$

$$i_{2w} = i_{2\alpha} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \sin \varphi - \cos \varphi}{2} - i_{2\beta} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi + \sin \varphi}{2} + i_{20} \quad (3.37)$$

Přeměna rotorového obvodu je těžší než statorového obvodu. Důvodem je nahrazení točícího se rotoru stojícím a třífázové vinutí dvoufázovým. [4]

Po úpravě rovnic pro napětí dostaneme



$$u_{1\alpha} = R_1 \cdot i_{1\alpha} + \frac{d\psi_{11\alpha}}{dt} + \frac{d\psi_{12\alpha}}{dt} \quad (3.38)$$

$$u_{1\beta} = R_1 \cdot i_{1\beta} + \frac{d\psi_{11\beta}}{dt} + \frac{d\psi_{12\alpha}}{dt} \quad (3.39)$$

$$u_{10} = R_1 \cdot i_{10} + \frac{d\psi_{10}}{dt} \quad (3.40)$$

$$-u_{2\alpha} = R_2 \cdot i_{2\alpha} + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \psi_{2\beta} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.41)$$

$$-u_{2\beta} = R_2 \cdot i_{2\beta} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} + \psi_{2\alpha} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.42)$$

$$-u_{20} = R_2 \cdot i_{20} + \frac{d\psi_{20}}{dt} \quad (3.43)$$

a vnitřní moment  $M_i$

$$M_i = p(\psi_{12\alpha} i_{1\beta} - \psi_{12\beta} i_{1\alpha}) \quad (3.44)$$

Spřažené magnetické toky

$$\psi_{11\alpha} = L_{11} \cdot i_{1\alpha} \quad (3.45)$$

$$\psi_{12\alpha} = \frac{2}{3} M_{12} \cdot i_{2\alpha} \quad (3.46)$$

$$\psi_{11\beta} = L_{11} \cdot i_{1\beta} \quad (3.47)$$

$$\psi_{12\beta} = \frac{2}{3} M_{12} \cdot i_{2\beta} \quad (3.48)$$

$$\psi_{10} = L_{10} \cdot i_{10} \quad (3.49)$$

$$\psi_{2\alpha} = \frac{2}{3} M_{12} \cdot i_{1\alpha} + L_{22} \cdot i_{2\alpha} \quad (3.50)$$

$$\psi_{2\beta} = \frac{2}{3} M_{12} \cdot i_{1\beta} + L_{22} \cdot i_{2\beta} \quad (3.51)$$

Rovnice 2.38 až 2.44 jsou zjednodušené vůči, kterým jsme vycházeli. Důvodem je indukčnost která je v nové soustavě konstantní a také platí, že  $u_{2\alpha}$ ,  $u_{2\beta}$ ,  $i_{10}$ ,  $i_{20}$ ,  $u_{10}$  a  $u_{20}$  jsou nulové.

Dále předpokládáme, že ve většině případů  $\frac{d\varphi}{dt} = p\omega_2 = \text{konst}$  a tím nemusíme uvažovat pohybovou rovnici.[4]

Z rovnic pro proudy  $i$  určíme skutečné proudy ve vinutích třífázového motoru.

### 3.2.2 Odpojení motoru od sítě

Postupný úbytek magnetického toku ve stroji je důvodem, proč nastává přechodový děj při odpojení stroje od zdroje elektrické energie.[4]

Při odpojení dochází ke postupnému zmenšení magnetického toku. Proud, který vznikají v rotoru stroje, brání změně toho toku, ale musí se splnit podmínka, že obvod rotoru je uzavřen. Pokud by rotorový obvod nebyl uzavřený, tak se jeho energie magnetického pole se ztrácí v oblouku, mezi kontakty vypínače, a mohou také vzniknout přepětí ve statoru. S časem se tento tok zmenšuje až se ustáli na nulové hodnotě. Rychlost poklesu toku závisí na hodnotách prvků ve vinutí rotoru.[4]

Vztah pro výpočet magnetického pole vzduchové mezery je:[4]

$$\phi_{vz} = \phi \cdot e^{-\gamma_2 t} \quad (3.52)$$

kde  $\gamma_2$  se vypočítá z odporu a indukčnosti vinutí rotoru:

$$\gamma_2 = \frac{R_2}{L_2} \quad (3.53)$$

V rotoru se postupně zmenšují proudy, tudíž vzniklé magnetomotorické síly nemění svou pozici vůči rotoru.[4]

Magnetický tok spřažený se statorem za normálního chodu stroje roven:

$$\phi = \phi \cdot e^{j\omega_1 t} \quad (3.54)$$

Tento tok způsobuje ve vinutí statoru vznik elektromagnetické síly:

$$E_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = -jN_1 \cdot \phi \cdot \omega_1 \cdot e^{j\omega_1 t} \quad (3.55)$$

Z teorie víme, že frekvence statoru a rotoru jsou jiná a jejich rozdíl je dán skluzem. To samé platí pro magnetické toky.

Při zanedbání skluzu je magnetický tok indukující elektromagnetické síly ve vinutí statoru o kmitočtu  $\omega_1$  v momentě odpojení. Za těchto podmínek je spřažený magnetický tok roven[4]

$$\phi \cdot e^{-\gamma_2 t} \cdot e^{j\omega_1 t} = \phi \cdot e^{(j\omega_1 - \gamma_2)t} \quad (3.56)$$

a tento tok indukuje ve statoru elektromagnetické síly:

$$E_1' = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \cdot (j\omega_1 - \gamma_2) \cdot \phi \cdot \omega_1 \cdot e^{(j\omega_1 - \gamma_2)t} \quad (3.57)$$

proto:

$$\frac{E_1'}{E_1} = \left(1 + j \frac{\gamma_2}{\omega_1}\right) \cdot e^{-\gamma_2 t} \quad (3.58)$$

Modul určíme v čase  $t = 0$ , tedy v okamžiku odpojení:

$$\left(\frac{E_1'}{E_1}\right)_{t=0} = \sqrt{1 + \left(\frac{R_2}{\omega_1 \cdot L_2}\right)^2} \quad (3.59)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že při velkém odporu  $R_2$  vznikají velká napětí a indukují se velké elektromagnetické síly ve vinutí statoru.[4]

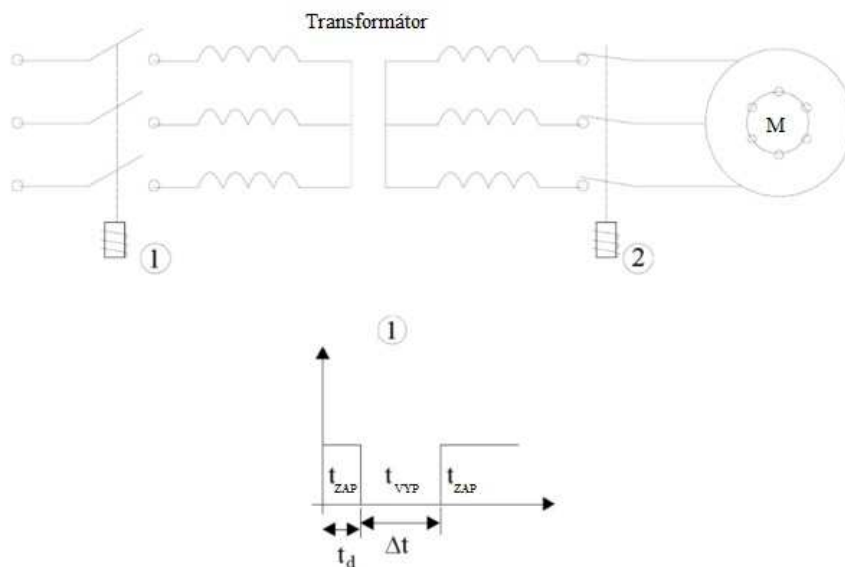
Přepětí, která byla naměřena u strojů s neuzavřeným rotorovým obvodem, dosahují velikosti 3 až 4 násobku jmenovitého napětí. Rotorový obvod musí být uzavřen při odpojení stroje od sítě. U klecových rotorů je toto splněno. Pokud vezmeme kroužkové motory musí být stroj opatřen buď spojovačem kroužků nakrátko, pokud se jedná o motor s odklápěčem kartáčů. Jestliže tato možnost není a kartáče jsou trvale přiloženy musí být obvod rotoru spojen dokrátko ze strany kartáčů.[4]

### 3.2.3 Nejzávažnější přechodové děje

Při krátkém přerušení zdroje napětí a následném připojení motoru k síti může proud a točivý moment dosáhnout větších spíčkových hodnot než při normálním rozjezdu nebo náhle zkratu.[6]

Stejnoseměrné proudy, které se nachází v statoru popřípadně v rotoru, mohou být prodlouženy jakoukoliv příčinou. Jejich vysoké úrovně mohou produkovat závažné proudy skrz

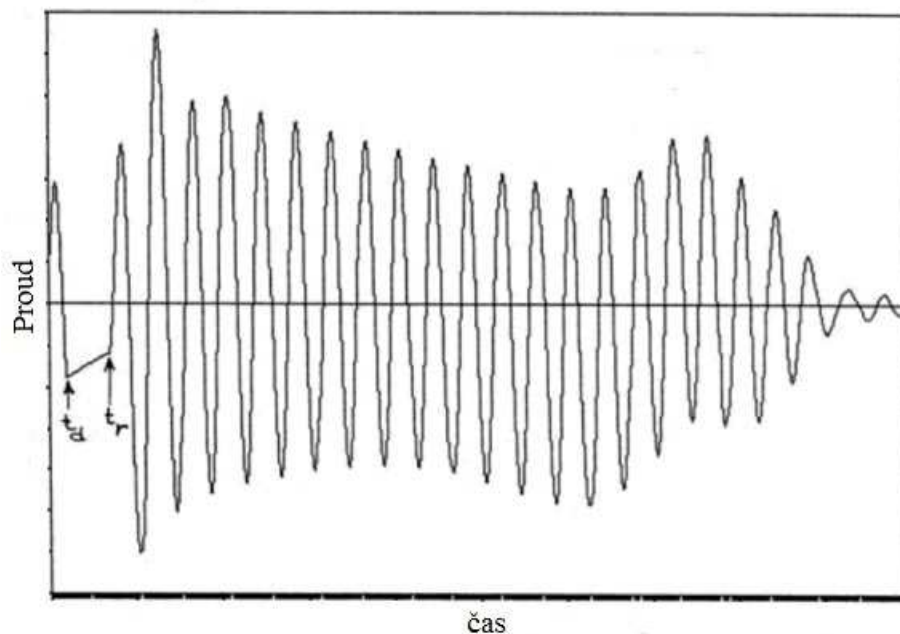
vzájemné působení mezi zanikajícími stejnosměrnými proudy, které se nacházely v motoru před opětovným připojením, a opětovným připojením střídavého zdroje.[6]



Obr. 13 Uspořádání pro nejzávažnější přechodové jevy[6]

Pokud napájíme asynchronní motor pomocí napěťového transformátoru, kde ihned po startu motoru vypne primární stranu  $t_d$  a po krátkém časovém intervalu  $\Delta t$  opětovně připojíme k síti. Potom velikost celkové impedance transformátoru, který má odpojenou primární stranu, je spojena do série s odporem statoru a rozptylovou reaktancí motoru.[6]

Když se zvětší odchylka času  $\Delta t$ , tak stejnosměrné složky proudu jsou vysoké, tak jako časová konstanta asynchronního motoru.[6]



Obr. 14 Průběh proudu motoru napájeného transformátorem[6]

#### 4 Měření naprázdno, nakrátko a výpočet náhradního schématu:

Měření proběhlo v laboratořích školy na motoru Siemens. Štítkové hodnoty jsou uvedeny na obr.3. Motor byl zapojen do hvězdy.

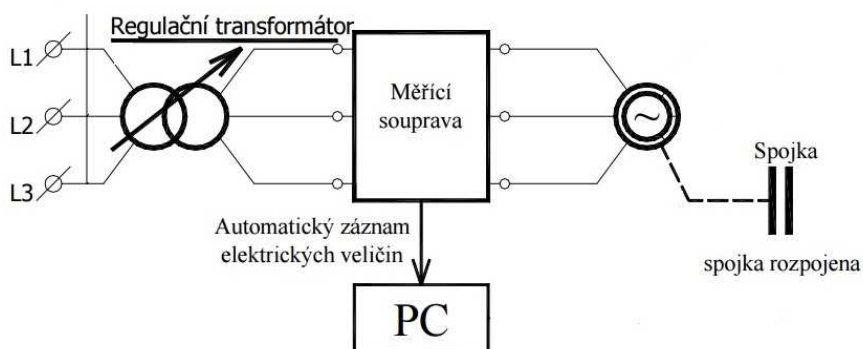
$U_N = 400 \text{ V}$	$I_N = 4,9 \text{ A}$	$P_N = 2,2 \text{ kW}$	$\cos \varphi_N = 0,81$	$n_N = 1425 \text{ min}^{-1}$	Zapojení Y
-----------------------	-----------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------

Tab. 1 Jmenovité hodnoty asynchronního motoru

##### 4.1 Měření naprázdno:

Měření naprázdno provádíme od 130% do 30%  $U_N$  a odečítáme hodnoty proudu a výkonu. Hřídel motoru není zatížena a rotor motor se otáčí téměř synchronními otáčkami. Provádí se za účel zjištění proudu naprázdno, účinníku naprázdno, ztrát v železe, mechanické ztráty a určení parametrů příčné větve náhradního schématu  $X_\mu$  a  $R_{Fe}$ . [7]

Schéma zapojení:



Obr. 15 Schéma zapojení pro měření naprázdno

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot:

$U_0$ %	$U_0$ V	$I_0$ A	$i'_0$ -	$P_0$ W	$\Delta P_{j0}$ W	$\Delta P_{fe}$ W	$\cos \varphi_0$ -
130	520	12,41	2,532	1958,6	1435,7	522,9	0,175
120	480	8,30	1,693	976,5	642,1	334,4	0,142
110	440	5,34	1,090	485,1	266,2	218,9	0,119
100	400	3,34	0,682	267,8	104,3	163,4	0,116
90	360	2,20	0,448	179,8	45,0	134,9	0,131
80	320	1,64	0,334	141,7	24,9	116,7	0,156
70	280	1,33	0,272	120,4	16,5	103,9	0,187
60	240	1,09	0,223	104,3	11,2	93,1	0,229
50	200	0,88	0,179	90,4	7,2	83,2	0,297
40	160	0,72	0,147	80,2	4,8	75,4	0,402
30	120	0,61	0,124	70,0	3,5	66,5	0,553

Tab. 2 Měření asynchronního motoru naprázdno

Výpočet hodnot z měření:

Z naměřených hodnot proudu, napětí a výkonu naprázdno můžeme spočítat účinník naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{267,7}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 3,34} = 0,116 \quad (4.1)$$

Poměrný proud naprázdno:

$$i'_0 = \frac{I_0}{I_N} = \frac{3,34}{4,9} = 0,682 \quad (4.2)$$

Při výpočtu joulových ztrát potřebujeme znát odpor vinutí statoru  $R_s$ , který se změřil při 20 °C a hodnoty pro jednotlivé vinutí jsou  $R_U = 3,16 \, \Omega$ ,  $R_V = 3,05 \, \Omega$  a  $R_W = 3,12 \, \Omega$ . Musí se z nich vypočítat střední hodnota.

$$R_1 = \frac{R_U + R_V + R_W}{3} = \frac{3,16 + 3,05 + 3,12}{3} = 3,11 \, \Omega \quad (4.3)$$

Další se určují Joulovy ztráty:

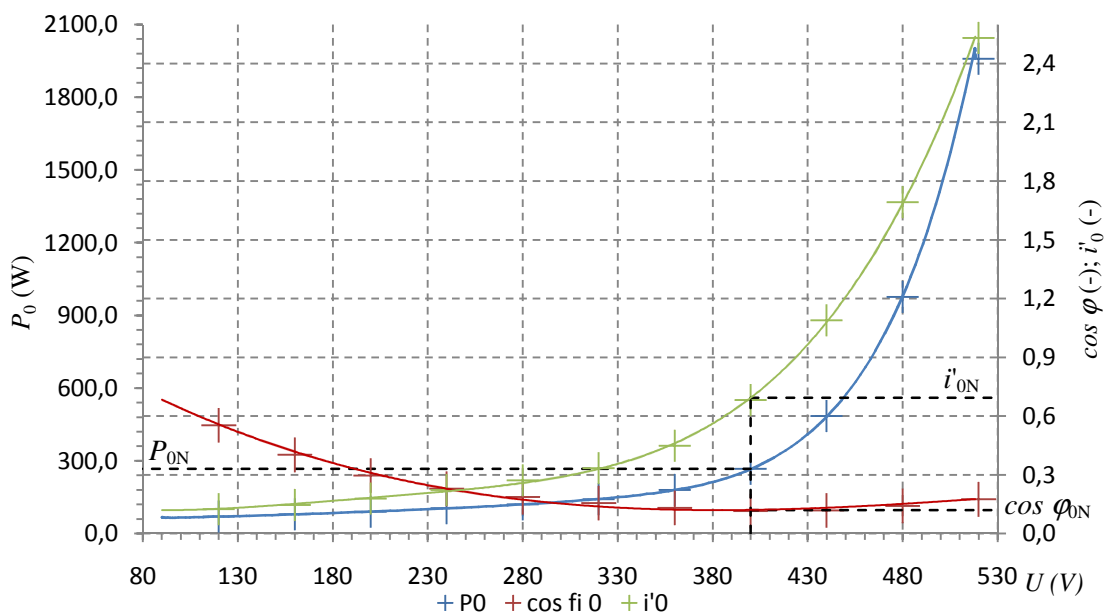
$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 = 3 \cdot 3,11 \cdot 3,34^2 = 104,3 \, \text{W} \quad (4.4)$$

a ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = P_0 - \Delta P_{j0} = 267,7 - 104,3 = 163,4 \, \text{W} \quad (4.5)$$

Mechanické ztráty se určují tak, že extrapolací křivky  $\Delta P_0$  (viz. Graf.3) jsou 22,2 W.

Graf naprázdno:

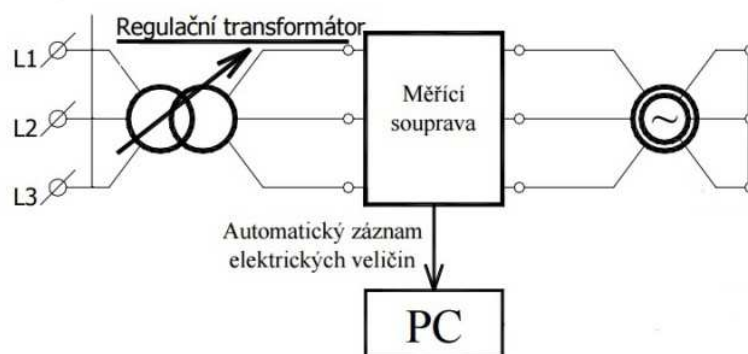


Graf.1 Charakteristiky měření naprázdno

## 4.2 Měření nakrátko:

Při měření nakrátko musíme motor napájet sníženým napětím a rotor motor je zablokován, tedy rotor se neotáčí. Provádíme od 120% do 30 %  $I_N$ . Obvykle stačí odečíst pár hodnot, neboť charakteristika je lineární. Zjišťujeme proud nakrátko, účinník nakrátko a prvky podélné větve náhradního schématu  $R$  a  $X_\sigma$ . [7]

Schéma zapojení:



Obr. 16 Schéma zapojení pro měření nakrátko

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot:

$I_k$	$I_k$	$i'_k$	$U_k$	$P_k$	$\cos \varphi_k$
%	A	-	V	W	-
120	5,88	1,20	107,5	671,32	0,613
115	5,64	1,15	103,8	614,92	0,607
105	5,15	1,05	96,5	512,50	0,596
100	4,90	1,00	92,8	465,96	0,592
95	4,66	0,95	89,3	423,09	0,588
85	4,17	0,85	81,4	336,37	0,573
80	3,92	0,80	78,3	305,37	0,574

Tab. 3 Měření asynchronního motoru nakrátko

Výpočet hodnot z měření:

Výpočet účinníku nakrátko:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k} = \frac{465,9}{\sqrt{3} \cdot 4,9 \cdot 92,8} = 0,592 \quad (4.6)$$

Poměrný proud nakrátko:

$$i'_k = \frac{I_k}{I_N} = \frac{4,9}{4,9} = 1 \quad (4.7)$$

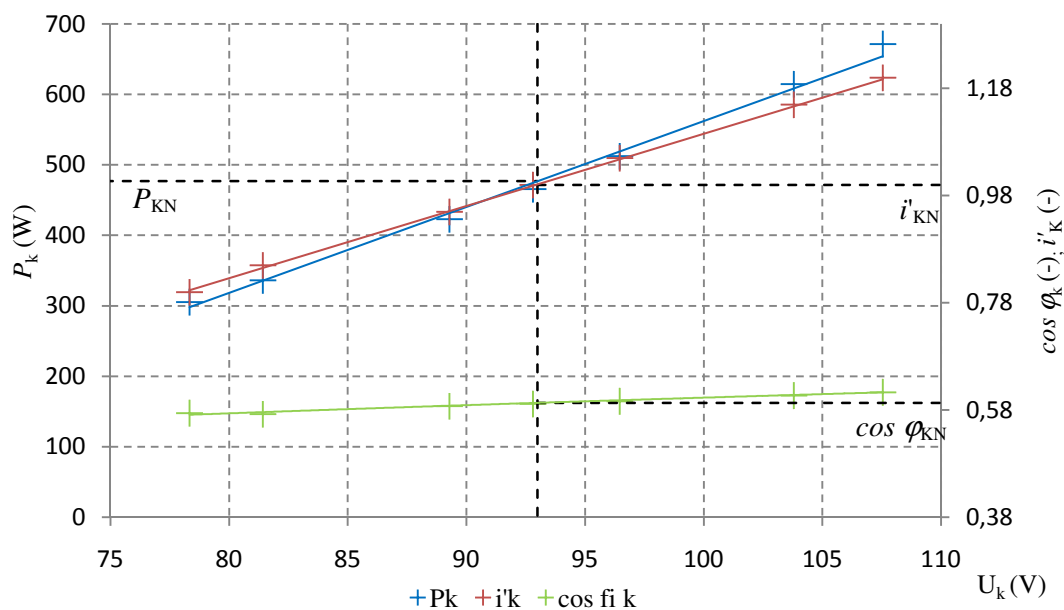
Určení zkratového proudu při jmenovitém napětí:

$$I_{kN} = I_k \cdot \frac{U_N - U_k^x}{U_k - U_k^x} = 4,9 \cdot \frac{400 - 18,8}{92,81 - 18,8} = 25,24 \text{ A} \quad (4.8)$$

Celkový činný odpor:

$$R_k = \frac{U_{fN} \cdot \cos \varphi_k}{I_{kN}} = \frac{230 \cdot 0,594}{25,24} = 5,41 \Omega \quad (4.9)$$

### Graf nakrátko:



Graf. 2 Charakteristika měření nakrátko

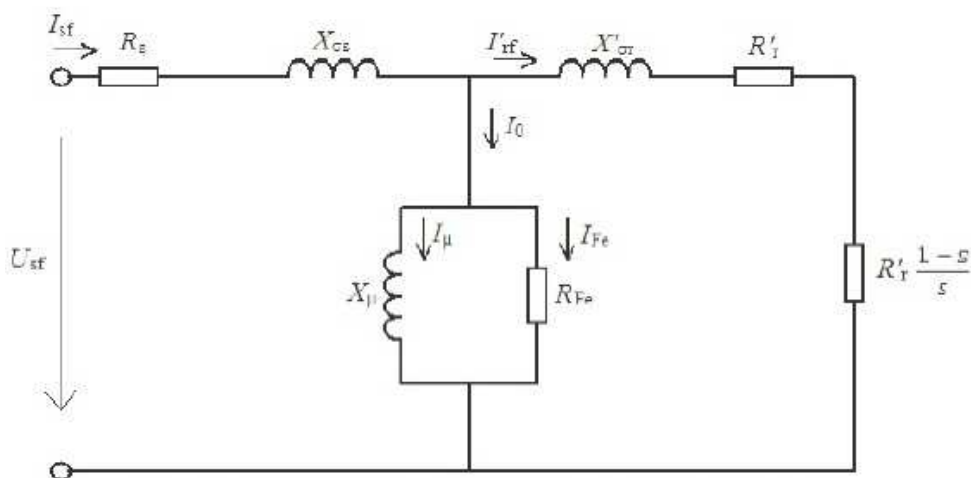
Shrnutí odečtených hodnot naprázdno a nakrátko.

Naprázdko		Nakrátko	
$I_{0N}$	3,3 A	$I_{KN}$	25,24 A
$\cos \varphi_{0N}$	0,115	$\cos \varphi_{KN}$	0,596
$P_{0N}$	267,7 W	$P_{KN}$	477 W

Tab. 4 Odečtené hodnoty naprázdno a nakrátko

### 4.3 Výpočet prvků náhradního schématu asynchronního motoru

Náhradní schéma se skládá z podélné a příčné větve. Kde podélná větev představuje stator a rotor stroje a příčná vzduchovou mezeru.[7]



Obr. 17 Náhradní schéma asynchronního motoru [7]

Při výpočtu budeme vycházet z hodnot odečtených z grafu naprázdno a nakrátko, tedy z grafu 1. a 2., které byly odečtené při jmenovitém napětí a proudu motoru a jsou odečtené v tabulce 3.

Pomocí rovnic 3.31 a 3.32 a hodnot z tabulky tab.4. vypočítáme proudy, které prochází příčnou větví [7]

$$I_{\mu} = I_{0N} \cdot \sin \varphi_{0N} = 3,35 \cdot 0,993 = 3,27 \text{ A} \quad (4.10)$$

$$I_{Fe} = I_{0N} \cdot \cos \varphi_{0N} = 3,35 \cdot 0,116 = 0,39 \text{ A} \quad (4.11)$$

Vypočítáme magnetickou reaktanci  $X_{\mu}$  a odpor  $R_{Fe}$ , které tvoří magnetizační větev

$$X_{\mu} = \frac{U_{fN}}{I_{\mu}} = \frac{230}{3,27} = 69,14 \Omega \quad (4.12)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{fN}}{I_{Fe}} = \frac{230}{0,39} = 591,9 \Omega \quad (4.13)$$

$$X_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{69,14}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,22 \Omega \quad (4.14)$$

Následně vypočteme velikost odporu  $R'_2$ , pro kterou musíme znát hodnotu odporu statorového vinutí, které známe z rovnice 4.3.[7]

$$R'_2 = R_k - R_1 = 5,41 - 3,11 = 2,3 \Omega \quad (4.15)$$

Velikost celkové rozptylové reaktance určíme z měření nakrátko

$$X_{\sigma} = X_{s\sigma} + X'_{r\sigma} = \sqrt{\left(\frac{U_{fN}}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{230}{25,24}\right)^2 - 5,41^2} = 7,33 \Omega \quad (4.16)$$

Dosazením rovnice 3.38 do rovnice 3.39 můžeme rovnou vypočítat jednotlivé rozptylové indukčnosti statoru a rotoru v náhradním obvodu stroje

$$L_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f}; L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{L_{\sigma}}{2} \quad (4.17; 4.18)$$

$$L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma}}{4 \cdot \pi \cdot f} = \frac{7,33}{4 \cdot \pi \cdot 50} = 11,67 \text{ mH} \quad (4.19)$$

Vypočítáme jmenovitou impedanci a můžeme k ní vztáhnout hodnoty prvků náhradního obvodu, které budou vyjádřeny v poměrných hodnotách

$$Z_N = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = \frac{230}{4,9} = 46,94 \Omega \quad (4.20)$$

## 5 Simulace v programu ETMP-ATP

Programem EMTP-ATP se může vyřešit a analyzovat přechodové jevy pro různé elektrické obvody, který použijí pro simulaci opětovného rozběhu.



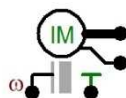
## 5.1 Parametry použitého motoru

Parametry uvedené v tabulce 5 a představují jmenovité hodnoty použitého motoru. Při analýze motoru použije náhradní schéma, pro které si vypočteme parametry, jenž jsou uvedeny v kapitole 4.3 a proto není nutné provádět tyto výpočty znovu.

$P_N = 2,2 \text{ kW}$	$I_{0N} = 3,35 \text{ A}$
$U_{1N} = 400 \text{ V}$	$\cos \varphi_{0N} = 0,116$
$I_{1N} = 4,9 \text{ A}$	$I_{KN} = 25,24 \text{ A}$
$n_N = 1425 \text{ min}^{-1}$	$\cos \varphi_{KN} = 0,594$
$f_1 = 50 \text{ Hz}$	$R_1 = 3,11 \Omega$
$J = 5600 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$R'_2 = 2,3 \Omega$
$M_N = 14,7 \text{ N} \cdot \text{m}$	$L_{\sigma s} = 11,67 \text{ mH}$
$p = 2$	$L_{\sigma r} = 11,67 \text{ mH}$
Zapojení Y	$L_{\mu} = 0,223 \text{ H}$

Tab. 5 Parametry motoru

Model asynchronního motoru UM3, který byl použit pro tuto simulaci, najdeme v knihovně, v sekci Electrical Machines.



Obr. 18 Model asynchronního motoru

Jeho parametry zadáme po otevření hlavního okna uvedeného na obr. 19, kde se nastavuje zapojení vynutí, frekvence, počet pólových dvojic. Další nastavení se provádí přepnutím dialogových oken mezi formuláři magnet, stator, rotor a init.

Attributes

General Magnet Stator Rotor Init

Stator coupling

Y

B

A

C

Rotor coils

d: 1 q: 1

Global

☒ Automatic
 ☒ Prediction

Pole pairs:

2

Frequency:

50

Tolerance:

0.1885

NODE	PHASE	NAME
Stator	ABC	X0001
M_NODE	1	X0005
BUSM	1	X0006
Neut	1	

Order: 0

Label:

Comment:

Output

TQOUT

☐ 0
 ☒ 1
 ☐ 2
 ☐ 3

OMOUT

☐ 0
 ☒ 1
 ☐ 2
 ☐ 3

☐ THOUT
 ☒ CURR

☐ Hide

Edit definitions

OK

Cancel

Help

Obr. 19 Hlavní dialogové okno modelu UM3

V záložce magnet se nastavuje hlavní indukčnost, která se vypočítá pomocí rovnice() a asynchronní motor má konstantní vzduchovou mezeru a proto v ose d a q jsou velikosti parametrů stejné, v další záložce, tedy stator, nastavujeme odpor statoru, který jsme si změřili při 20 °C pro všechny fáze a následně z nich udělali střední hodnotu, a indukčnost. Záložka rotor je téměř to samé co záložka stator, akorát místo odporu statoru použijeme odpor rotoru, který je přepočítaný na stator. Poslední záložka Init, tedy se nastavuje skluz motoru.

The figure shows four screenshots of the motor model configuration windows:

- Magnet:** LMUD: 0.28, LMUQ: 0.28. Saturation: none (selected), d, q, both, symm.
- Stator:** Table with R [ohm] and L [H/pu] for d and q axes.
 

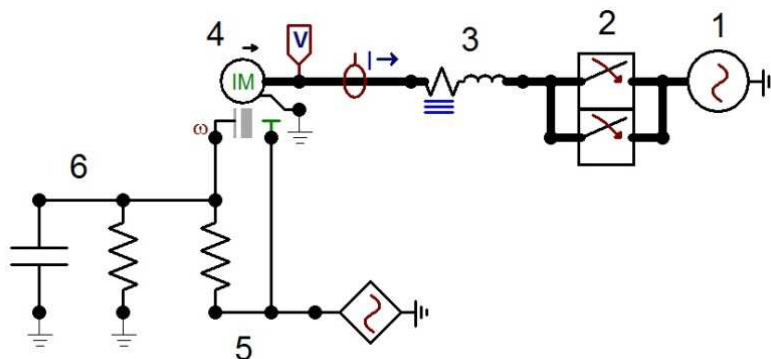
	R [ohm]	L [H/pu]
d	11.03	0.0203
q	11.03	0.0203
- Rotor:** Table with R [ohm] and L [H/pu] for two rotor circuits.
 

	R [ohm]	L [H/pu]
1	4.77	0.0203
2	4.77	0.0203
- Init:** Automatic. SLIP [%]: 100.

Obr. 20 Jednotlivé záložky asynchronního modelu motoru

Kompletní model je uveden na obr.10 a je složen ze 6 částí. Vyjmenujme si jednotlivé části:

1. Zdroj napětí
2. Vypínače pro řízení startu motoru
3. Parametry kabelů
4. Asynchronní motor
5. Zátěž motoru
6. Činitel tření a moment setrvačnosti

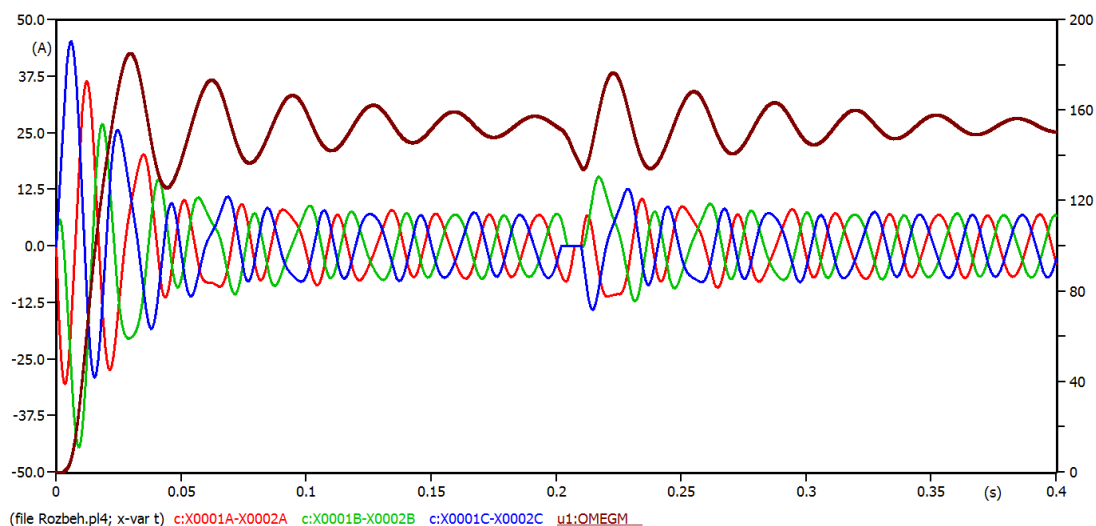


Obr. 21 Kompletní model asynchronního motoru

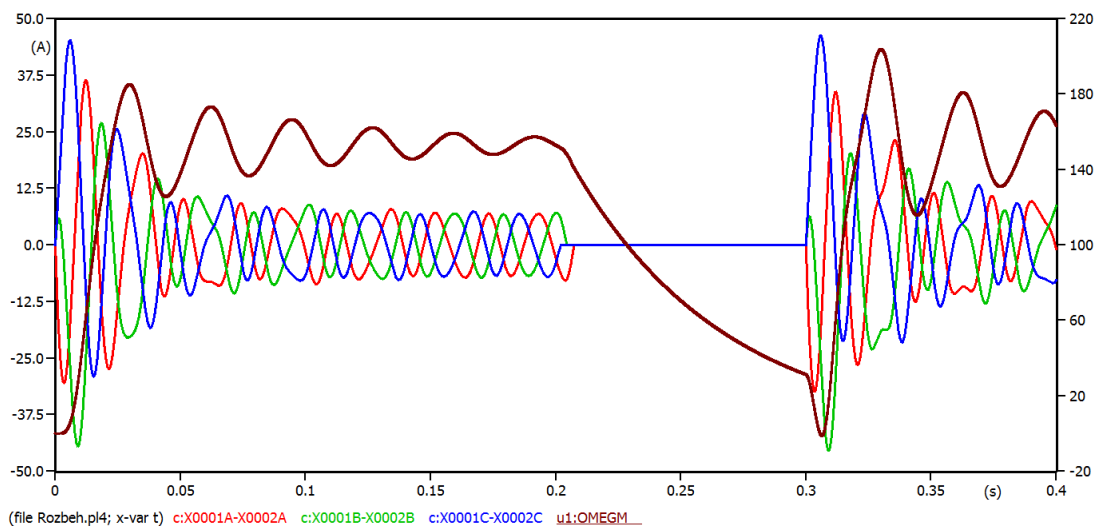
## 5.2 Simulace opětovného rozběhu pro stav bez zatížení

### 5.2.1 Opětovný rozběh

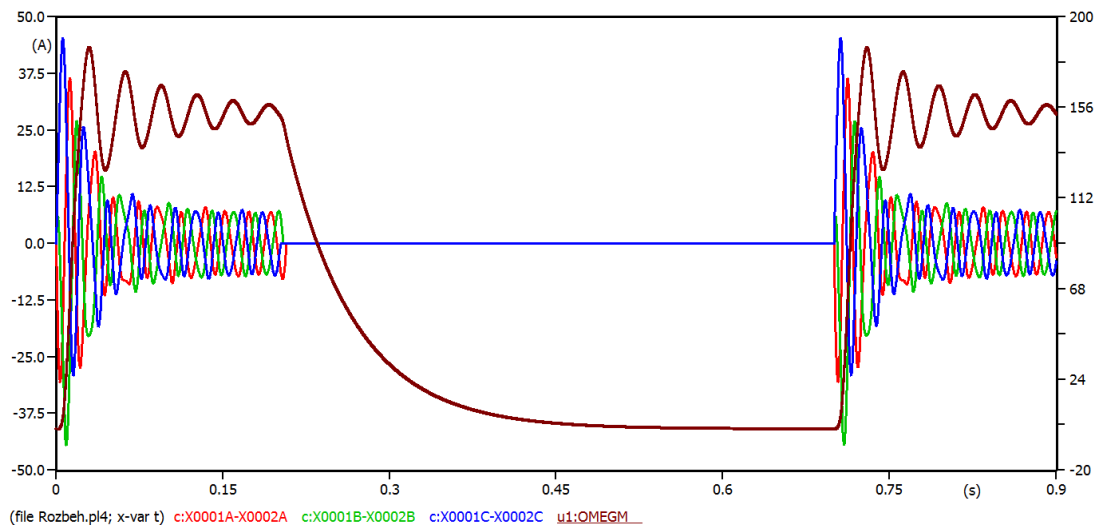
Veškeré pokyny pro nastavení byly probrány v předchozí kapitule. Schéma zapojení je stejné jako na obr. 21. Následující průběhy ukazují simulovaný proud ve všech fázích při různém čase, ve kterém dojde k opětovnému připojení. Čas 200 ms, při kterém dochází k rozpojení obvodu, je stejný pro všechny průběhy. Jediné co se bude měnit je čas opětovného rozběhu a to 10, 100 a 500 ms.



Obr. 22 Průběh proudů pro čas 10 ms



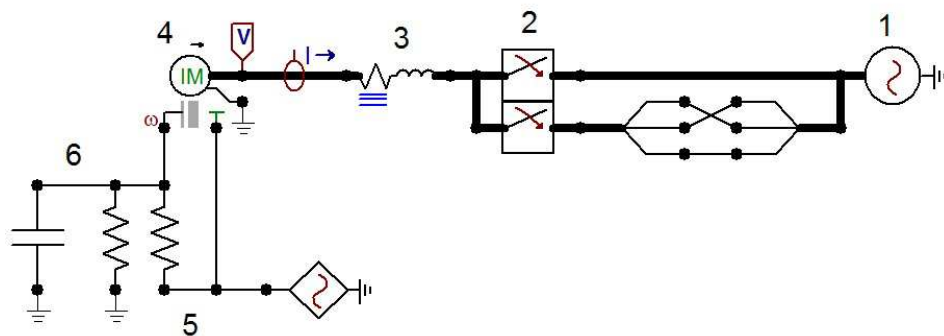
Obr. 23 Průběh proudů pro čas 100 ms



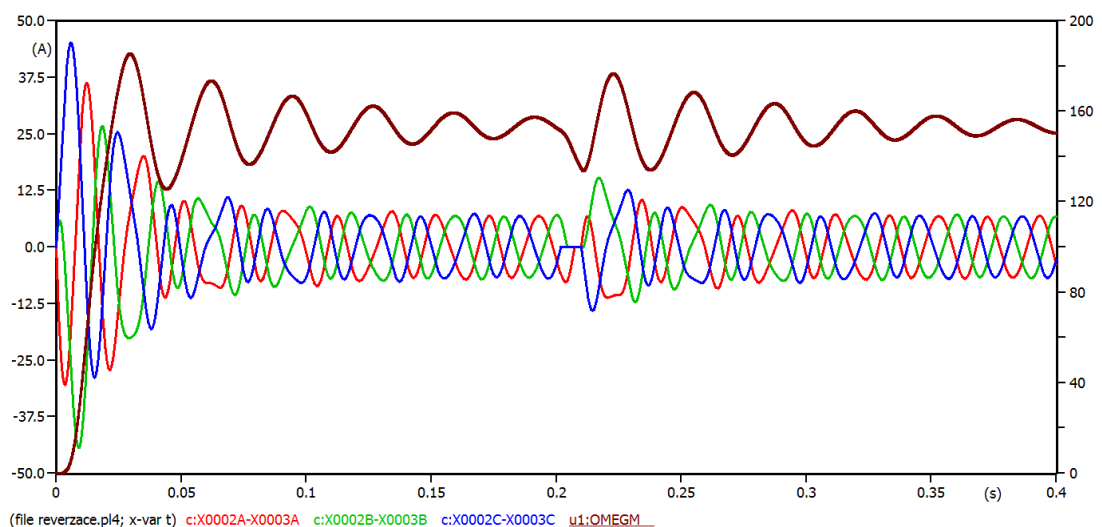
Obr. 24 Průběh proudů pro čas 500 ms

### 5.2.2 Opětovný rozběh pomocí reverzace

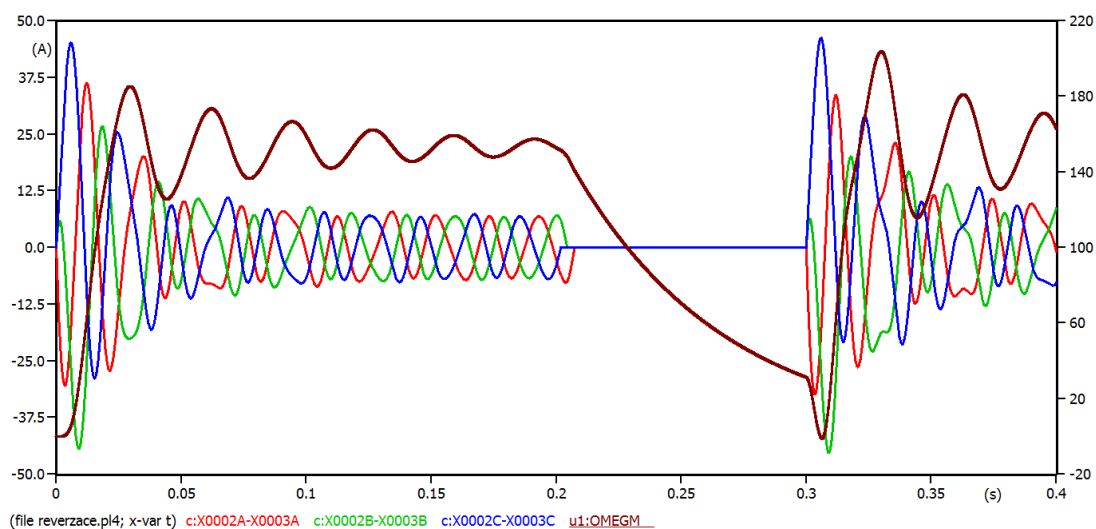
Následující zapojení je pro simulaci kdy jsme přehodili první fázi s druhou tedy reverzací. Časy kdy bude docházet k opětovnému připojení bude stejný jako v předchozím případě.



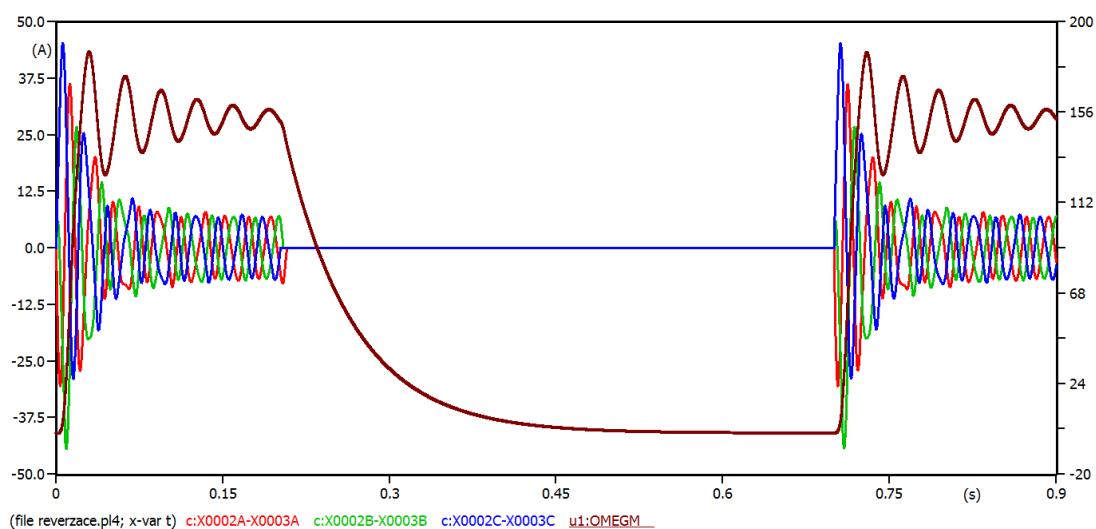
Obr. 25 Kompletní model asynchronního stroje s reverzací



Obr. 26 Průběh proudů pro čas 10 ms



Obr. 27 Průběh proudů pro čas 100 ms



Obr. 28 Průběh proudů pro čas 500 ms

### 5.2.3 Simulovaný záběrný proud

Tabulka 6 ukazuje odečtené hodnoty simulovaného opětovného rozběhu, kde  $I_{ZAB1}$  je hodnota prvotního proudu při rozběhu a  $I_{ZAB2}$  je hodnota záběrného proudu při opakovaném rozběhu. Čas  $t$  je doba, při kterém se motor opětovně rozběhne po prvotním vypnutí.

Rozběh				Reverzace			
Průběh	$I_{ZAB1}$	$I_{ZAB2}$	$t$	Průběh	$I_{ZAB1}$	$I_{ZAB2}$	$t$
	A	A	ms		A	A	ms
1	45	15	10	1	45	15	10
2	45	46	100	2	45	46	100
3	45	45	500	3	45	45	500

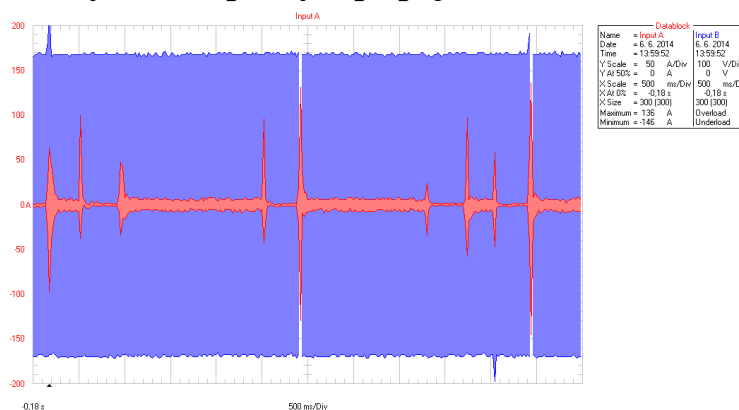
Tab. 6 Odečtené záběrné proudy pro průběhy

## 6 Měření opětovného rozběhu

Při měření opětovného rozběhu byla měřena jedna fáze motoru, která se měřila osciloskopem Fluke, a snímaly se proudové špičky v okamžiku dalšího připojení stroje na síť.

Měřilo se pro tři typy zapojení přímým připojením na síť, reverzací a napájení motoru přes transformátor, tedy sníženým napětím.

### 6.1 Opětovný rozběh přímým připojením na síť

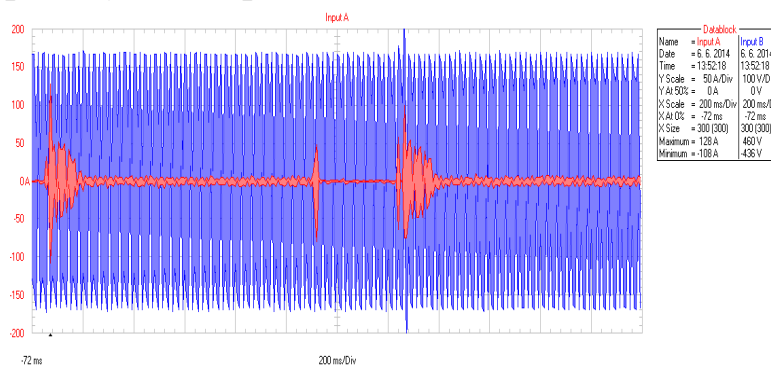


Obr. 29 Průběh opětovného rozběhu přímým připojením na síť

Rozběh	$I_{\text{NAR}}$	$T$
	A	s
1	-98	0
2	100	0,34
3	48	0,78
4	96	2,34
5	132	2,74
6	-34	4,12
7	98	4,56
8	58	4,86
9	-146	5,26

Tab. 7 Nárazové proudy při jednotlivých rozbězích

### 6.2 Opětovný rozběh při reverzací

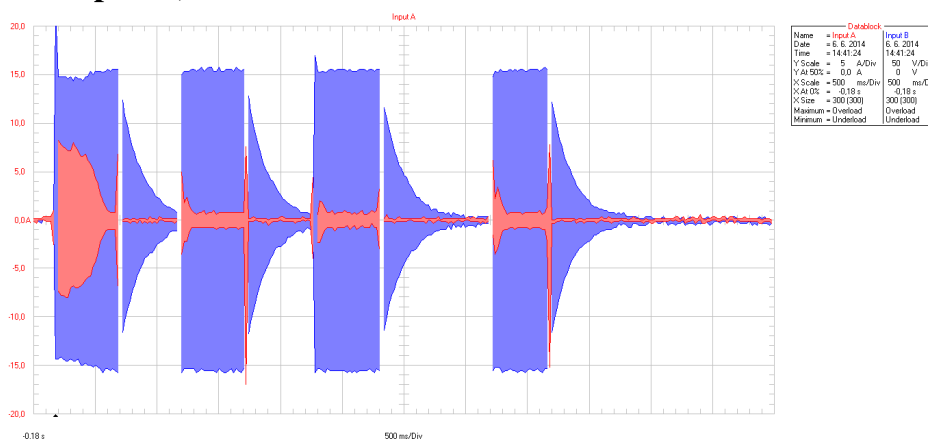


Obr. 30 Průběh opětovného rozběhu při reverzací

Rozběh	$I_{NAR}$	Čas
	A	s
1	128	0
2	-80	1,048
3	-64	1,368
4	100	1,392

Tab. 8 Nárazové proudy při jednotlivých rozbězích

### 6.3 Opětovný rozběh při napájení přes transformátor (sníženým napětím)



Obr. 31 Průběh opětovného rozběhu při napájení přes transformátor (sníženým napětím)

Rozběh	$I_{NAR}$	Čas
	A	s
1	8,2	0
2	6,8	0,48
3	5	1
4	-17	1,52
5	4,4	2,06
6	3,2	2
7	6,2	3,52
8	-15,2	3,98

Tab. 9 Nárazové proudy při jednotlivých rozbězích

## 7 Vyhodnocení

Jednotlivé simulace mají hodnotu nárazového proudu při prvním rozběhu stejnou, okolo 45 A. Důležitější je druhý rozběh. Z obr. 22 a 26 je vidět, že hodnoty nárazového proudu jsou malé, téměř jmenovité. Je to způsobeno magnetickým polem motoru, který se ještě nestihl ustálit po prvním vypnutí a motor se ještě točí vlivem setrvačných sil. V dalších simulacích, kde je čas mezi opětovným rozběhem větší, jsou hodnoty nárazových proudů větší. Z důvodu, že magnetické pole motoru a proudové špičky se neprojevují v prvních milisekundách, ale při větším časovém intervalu, jsou nárazové proudy stejné jako při prvotním rozběhu. V druhém časovém intervalu 100 ms je záběrný proud dokonce větší než proud při prvotním rozběhu. Pokud by se porovnával stav při zatížení motoru, tak budou nárazové špičky větší než v případě nezatíženého stavu.

U měření jsou jednotlivé nárazové proudy s časem, kdy došlo k rozběhu, vypsány v tabulkách 6, 7 a 8. U prvního typu rozběhu, tedy přímým připojením na síť, je největší hodnota proudu -146 A při čase 5,26 sekund a nejmenší hodnota 34 A v čase 4,12 sekund. Je to způsobeno okamžitou hodnotou napětí, která byla nejspíše kolem svého minima v případě -146 A. Za to při 34 A by se napětí mohlo pohybovat pod střední hodnoty. Hodnoty nárazových proudů pro reverzaci jsou 100 A v čase 1,392 sekund a nejmenší -64 v čase 1,368 sekund. Důvodem velikosti nárazových hodnot proudů je to samé jako v předchozím případě.

U posledního typu měření si můžeme povšimnout, že hodnota nárazového proudu se zmenšila alespoň pětkrát. Je to způsobeno tím, že motor byl napájen sníženým napětím a celková impedance motoru a sekundární strany je podstatně větší. To však znamená, že se změnila časová konstanta a tím pádem se prodloužil čas, kdy dojde k ustálení přechodného děje.

Měřela se pouze jedna fáze motoru, ale nárazový proud se vytváří i v ostatních fázích motoru. Jenom jsou okamžité hodnoty napětí pootočený o  $120^\circ$  vůči sobě. Takže se může stát, že v jedné fázi motoru bude nárazový proud malý, ale v ostatních může být větší.

Opětovný rozběh motoru může vyvolat větší oteplení než stav při trvalém zatížení. to může vést k tepelné deformaci zubů, změnit radiální rozměry vzduchové mezery a způsobit drhnutí rotoru o stator. Dále se spotřebuje větší množství energie při rozběhu a ztráty jsou vyšší.

## 8 Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval opětovným rozběhem asynchronního motoru, kde jsem se zabýval rozbořem asynchronních strojů, jejich princip funkce, konstrukci a další. Následně jsem probral přechodný děj v motoru a ukázal postup řešení těchto dějů. Dále se rozebralo měření naprázdno, nakrátko a udělal se výpočet náhradního schématu. Poté se provedla simulace opětovného rozběhu v programu EMTP-ATP. Nakonec se odečetly nárazové špičky proudů z příslušných průběhů z osciloskopu.

V první části jsem rozbíral asynchronní stroje. Jejich princip činnosti je založen na magnetické indukci, a proto se jim říká indukční stroje. Dále jsem rozebral konstrukci, která se skládá ze tří částí elektrické, mechanické a magnetické. Přičemž nejdůležitější část je stator a rotor, které se skládají z dynamoplechů. Asynchronní motor můžeme používat ve třech režimech, generátor, motor a brzda, přičemž generátorický režim se téměř vůbec nepoužívá. Poslední podčást byla věnována spouštění, kde chceme po motorech co nejmenší záběrný proud a velký záběrný moment, přičemž hodnota záběrného proudu se dá omezit napětím nebo impedancí. Spouštění sníženým napětím omezujeme i záběrný moment. Další omezení je zvětšením impedance. Tento způsob



jde použít pouze u kroužkových motoru. Dále můžeme využít spouštění pomocí přepínače hvězda trojúhelník a měnič kmitočtu, který se v dnešní době používá nejčastěji.

Druhá část se zabývá přechodným dějem v asynchronním motoru, kde jsem na začátku této kapitoly rozebral RL obvod a zjistil jsem, že velikost proud se dá zmenšit zvětšením impedance obvodu nebo snížením napětí. Také záleží v jakém okamžiku se nachází okamžitá hodnota napětí při sepnutí spínače. Poté byl rozebran přechodný děj v asynchronním motoru, kde jsem zjistil, že při řešení se v rovnicích nachází hodně proměnných, tak si musíme řešení těchto rovnic ulehčit. Tím pádem se nahrazuje točivá soustava netočivou a třífázové vinutí dvoufázovým vinutím.

Třetí část byla zaměřena na vypracování měření naprázdno, nakrátko a výpočtu náhradního schématu. Jako první se vypracovalo měření naprázdno, kde se z hodnot, které se odečetly z měření, udělaly grafy, ze kterých se odečetly jmenovité hodnoty naprázdno pro jmenovité napětí motoru. Následuje měření nakrátko, kde postup je stejný jako v předchozím případě akorát s tím, že místo pro jmenovité napětí motoru se hodnoty odečítají pro jmenovitý proud. Poslední podčást byla zaměřena na výpočet náhradního schématu, kterou potřebujeme pro simulační model.

Ve čtvrté části je rozebrána tvorba simulačního modelu pro opětovný rozběh, kde se v první podčásti nachází nastavení hodnot modelu motoru IM3 a popis celkového simulačního modelu. Následně jsou zde nasimulovány tři průběhy, které se liší pouze časová prodleva mezi opětovným rozběhem, pro dva typy rozběhu. Jak se dalo všimnout z těchto průběhů, tak velikost nárazového proudu při opětovném rozběhu závisí na setrvačnosti otáčení rotoru.

Pátá část je věnována samotnému měření opětovného rozběhu v laboratořích, kde se pomocí osciloskopu snímala jedna fáze motoru. Následně se odečetly nárazové proudy a čas kdy došlo k opětovnému rozběhu. Změřili se tři typy rozběhu a to přímé připojení na síť, které se používá pro motory do 3 kW, reverzace a napájení přes transformátor, kde hodnota napětí, které napájelo motor bylo sniženo.

## 9 Literatura

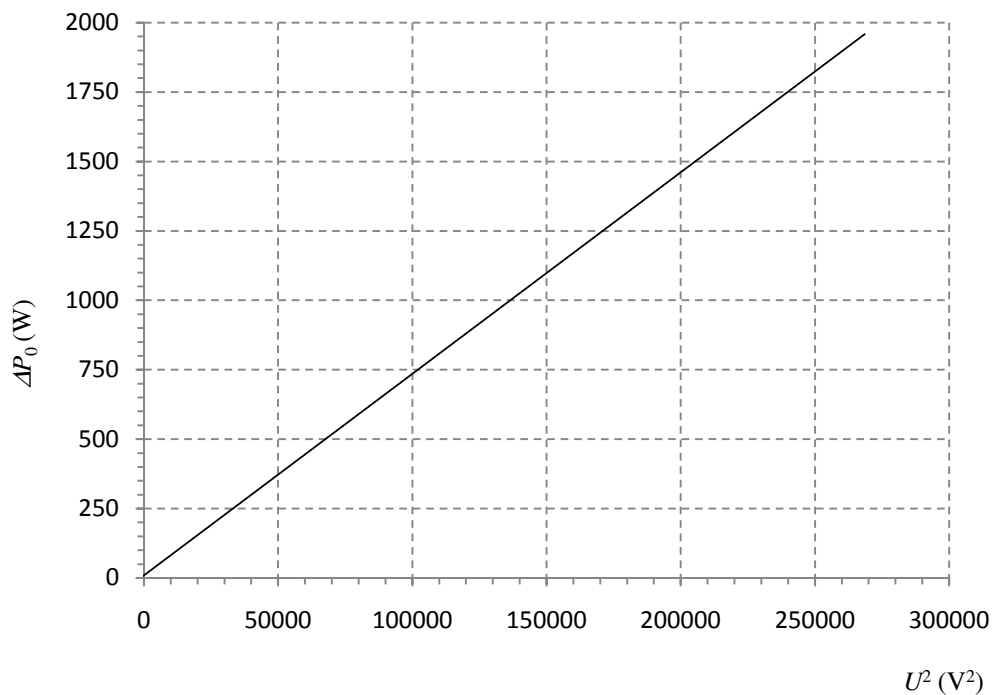
- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [2] SOBOTA, Pavel, RUSNOK, Stanislav. *Cvičení z elektrických strojů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2013. ISBN 978-80-248-3288-3.
- [3] KOČMAN, Karel, JOZEF HOLBA, ALEXANDER IHLÁR a RUDOLF MRAVENEČ. *Elektrické stroje a přístroje 1*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1982. ISBN 509-21-857.
- [5] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. 2. nezm. vyd. Brno: VUT, 1980. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 04-529-85.
- [6] BOLDEA, I a S NASAR. *The induction machine handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-0004-5.
- [7] HRABOVCOVÁ, Valéria. *Merenie a modelovanie elektrických strojov*. 2. vyd. Žilina: EDIS, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
- [8] *Asynchronní motory – konstrukce* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://p.kobrlc.sweb.cz/stroje/am.pdf>
- [9] *ELEKTRÁRNY* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [http://oklzed.sweb.cz/s/el\\_generator.htm](http://oklzed.sweb.cz/s/el_generator.htm)
- [10] RUSNOK, Stanislav, Pavel SOBOTA, VELESILAV MACH MACH, PETR KAČOR a STANISLAV MIŠÁK. *Possibilities of Program EMTP-ATP to Analyze the Starting Current of Induction motor in Frequent Switching*. , 6 s. DOI: 978-1-4673-6788-2.

## 10 Seznam příloh

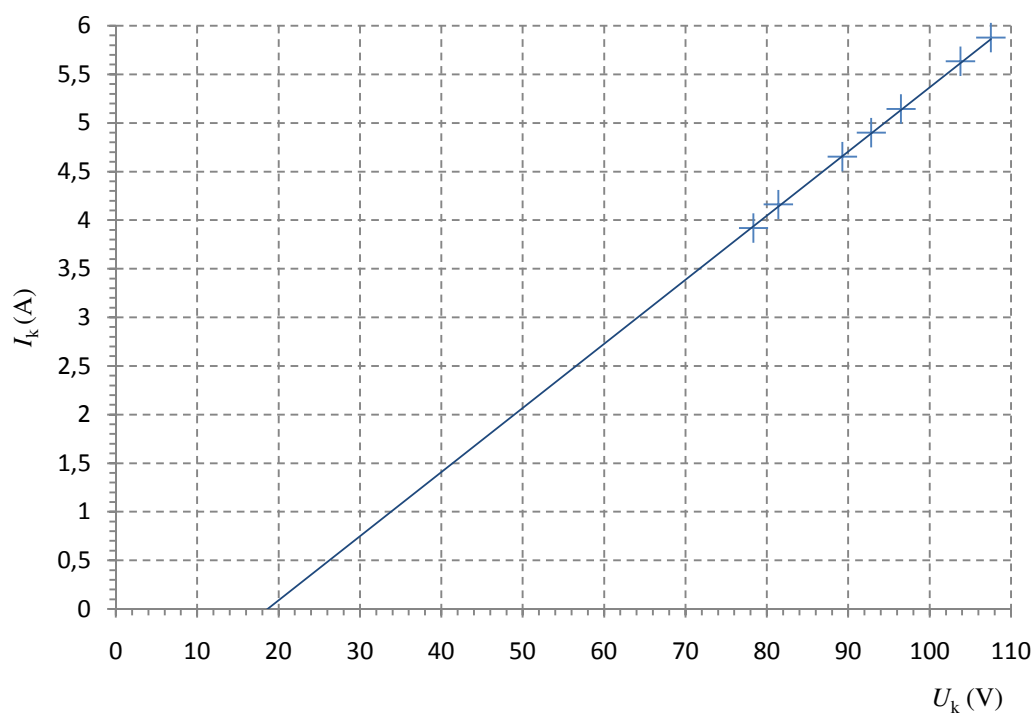
- I - Určení mechanických ztrát..... 1  
II- Určení proud  $I_{KN}$  vzhledem k sycení stroje..... 1

## 11 Přílohy

### Příloha I



### Příloha II



## **12 Seznam přiloženého CD**

1.   Bakalářská práce
2.   Simulace v programu ATP
3.   Průběhy z osciloskopu